

PREDICCIÓN DEL AGUA DISPONIBLE USANDO FUNCIONES DE PEDOTRANSFERENCIA EN SUELOS AGRÍCOLAS DE LA REGIÓN PAMPEANA

F DAMIANO¹, MA TABOADA²

¹ Instituto de Clima y Agua. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). 1712 Castelar, Buenos Aires. E-mail: fdamiano@cni.inta.gov.ar

² Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes. Facultad de Agronomía UBA. Av. San Martín 4453, 1417 Buenos Aires. E-mail: mtaboada@mail.agro.uba.ar

Recibido 28 de agosto de 2000, aceptado 8 de noviembre de 2000.

PREDICTION OF AVAILABLE SOIL WATER USING PEDO-TRANSFER FUNCTIONS IN AGRICULTURAL SOILS OF THE PAMPEAN REGION

The yield of agricultural crops largely depends on soil available water capacity (CAD), which usually is estimated from the amount of water retained at -33.3 and -1500 kPa matric potential. The soil cartographical information of the pampean region seldom have this information, limiting the construction of crop yields simulation models. The objectives of this paper were: a) to predict CAD from different pedo-transfer functions (FPT) in pampean soils, and b) to represent the spatial distribution of the predicted CAD values. The CAD values were arranged as follows: fine textured soil Series (M. Juárez, Oncativo, Monte Buey and Los Cardos) > medium textured soil Series (Balcarce and Udaondo) > coarse textured soil Series (Anguil and San Claudio) = soil Series with mechanical impedances which limit plant rooting depth (Roldán and Ramblones). None of the four studied FPT predicted reasonably soil CAD in the whole pampean region, but each one of them worked properly in the area where originally calibrated. Predicted CAD values of pampean soils varied between 28 and 180 mm. The lower CAD (18 % of soils) corresponded to Entic Haplustolls and Petrocalcic Calciustolls, at the west of the pampean region, while the higher CAD corresponded to Typic Argiudolls (19 % of soils) mainly at the center-east of the region. The combination of the predicted CAD values and the information existing in already published soil maps allowed us to characterise crop water availability on a regional basis. This information was included in a new 1:500.000 scale soil map.

Key words: Available Water Capacity - Pedo-Transfer Functions - Soil Water - Soil Maps - Pampean Region.

INTRODUCCION

La producción de cultivos agrícolas depende, además de los aportes externos de agua (i.e. lluvia o riego), de la capacidad de agua disponible de los suelos (CAD). El cálculo de CAD surge usualmente de conocer previamente la retención de humedad entre dos valores discretos de potencial mátrico (i.e. -33 kPa y -1500 kPa). La determinación de estos valores, tanto a campo como en laboratorio, es costosa en tiempo y recursos, además de demandar un gran número de muestras debido a la variabilidad espacial del suelo (Klute 1986).

La región pampeana es la principal productora de cereales y oleaginosos de nuestro país, contribuyendo con el 65% del Producto Nacional Bruto (i.e. 14%) originado por la agricultura argentina (CEPAL, citado por Hall

et al. 1992). La región pampeana posee diversas subregiones fisiográficas, cada una cubierta con diferente tipo de suelos y funcionamiento hidrológico.

La información cartográfica publicada por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) en las Cartas de Suelos de la República Argentina carecen en general de datos de retención hídrica. Las mediciones de CAD han sido poco numerosas y localizadas en sitios específicos, con la finalidad de determinar las necesidades de agua de los cultivos (Totis de Zeljkovich *et al.* 1996) y el ajuste de funciones de estimación con datos conocidos de un perfil de suelo (Pecorari *et al.* 1988; Travasso, Suero 1994). A estas ecuaciones, que relacionan distintas variables del suelo con el contenido de agua volumétrico

a potenciales de agua seleccionados, se las denominan funciones de pedo-transferencia (FPT). Estas funciones se basan en ecuaciones que tienen como argumento básico atributos que describen al suelo (e.g. distribución de tamaño de partículas, densidad aparente y contenido de carbono orgánico) y producen como resultado la función de retención de agua (Kern 1995). El INTA cuenta con un sistema de información geográfica que, siguiendo la metodología SOTER (van Engelen, Peters 1995), asocia la cartografía de unidades a escala 1:5M con una base de datos con suelos y paisajes. La base SOTER de Argentina carece de datos medidos de retención de agua, información que es imprescindible para conocer la exactitud, fiabilidad y utilidad de los

métodos empíricos que predicen CAD (Pachepsky *et al.* 1999). Previamente, hemos probado la efectividad de FPT en comparaciones con mediciones independientes de suelos de la región pampeana (Damiano *et al.* 1996). La posibilidad de disponer de un patrón de distribución geográfico gradual de propiedades hidráulicas es un factor importante para estudiar la respuesta de los cultivos, la vegetación y los sistemas hidrológicos a escala regional. Los objetivos de este trabajo fueron: a) evaluar funciones predictivas del contenido de agua a potenciales mátricos fijos, -33 kPa y -1500 kPa, para seleccionar la más apropiada para diferentes subregiones pampeanas; b) estimar y representar espacialmente la capacidad de retención de

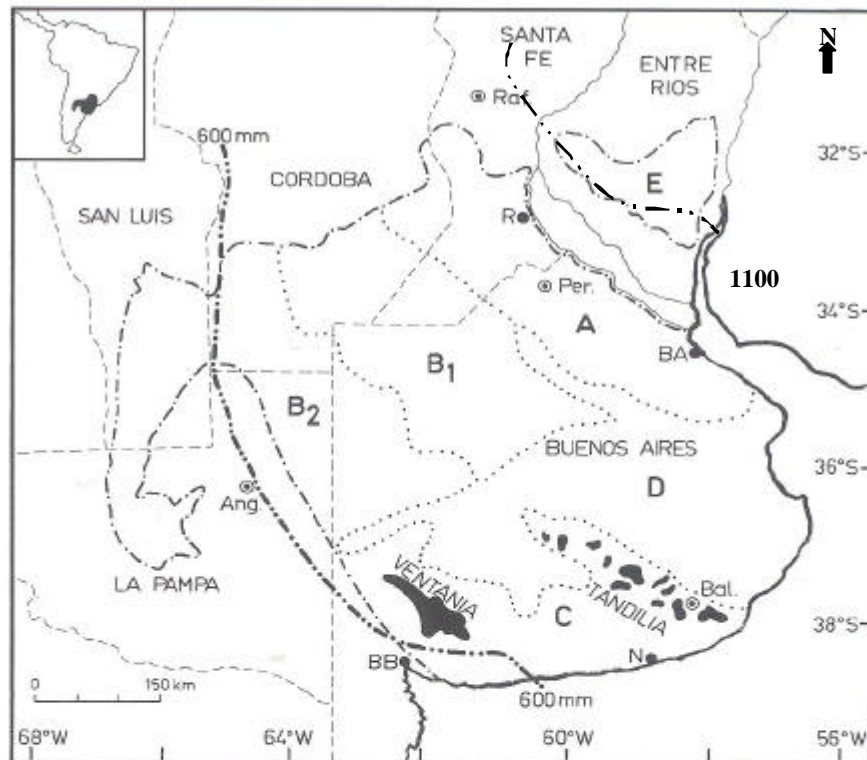


Figura 1. Subdivisión de la Pradera Pampeana. [A. Pampa Ondulada; B. Pampa Interior (B₁. Plana, B₂. Occidental); C. Pampa Austral; D. Pampa Inundable; E. Pampa Mesopotámica]. Límites regional (- - -), subregional (. . .) e interprovincial (- - -). Precipitaciones medias anuales (-.-.-). Localidades (●): Ang, Anguil; BA, Buenos Aires; Bal, Balcarce; BB, Bahía Blanca; N, Necochea; Per, Pergamino; Raf, Rafaela; R, Rosario. Fuente: Hall *et al.* (1992).

Figure 1. Subdivision of the Pampean Region. [A. Pampa Ondulada; B. Pampa Interior (B₁. Plana, B₂. Occidental); C. Pampa Austral; D. Pampa Inundable; E. Pampa Mesopotámica]. Regional (- - -), Subregional (. . .) and Interprovincial borders (- - -). Mean annual precipitation (-.-.-). Populations (●): Ang, Anguil; BA, Buenos Aires; Bal, Balcarce; BB, Bahía Blanca; N, Necochea; Per, Pergamino; Raf, Rafaela; R, Rosario. Extracted from Hall *et al.* (1992).

agua del suelo en la región pampeana a escala 1:500 000, combinando una base de datos de suelos, funciones de pedo-transferencia, y un programa de interpolación lineal de puntos.

MATERIALES Y METODOS

Factores del medio geográfico

El estudio abarcó aproximadamente 58 Mha (33 Mha con aptitud agrícola), entre las latitudes Sur de 31° y 40° y entre las longitudes Oeste de 57° y 65°, comprendiendo así a la Región Pampeana y áreas adyacentes (Figura 1). El clima es templado húmedo sin estación seca y con un verano cálido. La temperatura media anual es de 14 °C en el sur y 18 °C en el norte, el régimen anual de lluvia es de 600 mm en el sur y oeste y 1100 mm en el noreste, y la evapotranspiración media anual, según Thornthwaite, aumenta desde 750 mm en el sur a 1000 mm en el norte.

Las subregiones geomorfológicas Pampa Ondulada (A), P. Austral (C) y P. Mesopotámica (E), presentan un sistema de drenaje exorreico bien desarrollado. En cambio, la exigua pendiente de la Pampa Inundable (D) restringe la evacuación de los excesos hídricos y la red de drenaje natural de la Pampa Interior (B) es endorreica y pobremente desarrollada. Al este de la Pampa Interior se encuentra la Pampa Interior Plana (B1) que tiene extensas áreas con lagunas permanentes y temporarias, mientras que al oeste (B₂, Pampa Interior Occidental) ha sido fuertemente moldeada por el viento.

Los suelos más cultivados pertenecen al Orden de los Molisoles, desarrollados sobre sedimentos eólicos profundos del Pleistoceno, bajo pastizales, en un régimen de humedad údico y en menor proporción ústico en el sector suroeste-noroeste, y régimen térmico de temperatura. Los Sub-Grupos de suelo representativos de la Pampa Ondulada y Austral son los Argiudoles Típico y Ácuico. Un perfil típico de estos suelos presenta un horizonte superior de textura franco a franco arcillo limosa, moderadamente ácido y bien provisto de materia orgánica (mayor de 3 %), seguido de un horizonte B argílico (contenido de arcilla mayor de 35 %). En la Pampa Mesopotámica predominan suelos con propiedades vérticas, de textura franco arcillo limosa a arcillo limosa. En la Pampa Interior, lo hacen los Hapludoles Típicos y Énticos con moderado a bajo contenido de materia orgánica (menor de 2,5 %) y textura franco arenosa. En la Pampa Inundable o Deprimida no más de un 10 % de los suelos posee aptitud agrícola, debido a limitaciones por hidro-halormorfismo. Un quinto de la superficie total (10 Mha) se cultiva anualmente con cereales y oleaginosas. En este

sentido, se destaca la Pampa Ondulada con el 65 % del área cultivada. En las Pampas Austral, Interior y Mesopotámica se cultivan entre 28 y 16 % de sus respectivas superficies.

Base de datos de suelos

Se organizó en soporte magnético una base de datos de perfiles de suelo de acuerdo con los siguientes criterios: i) identificación y descripción taxonómica, ii) representatividad del dominio de la unidad de mapeo, y iii) aptitud agrícola. En primer lugar, se acudió a los Mapas de Suelos de INTA relevados en la década del 70 a escala 1:500 000 en Buenos Aires, Santa Fe, La Pampa, Córdoba y Entre Ríos. Estos mapas básicos no se encuentran correlacionados espacialmente, tomándose como base de integración la distribución geográfica de unidades de mapeo informada por Hall *et al.* (1992) (Figura 2).

En la Tabla 1 se describen las 27 asociaciones de Sub-Grupos de suelo, agrupados según las unidades geomorfológicas descritas en la Figura 1. Del total de unidades de mapeo, se exceptuó el número 5 por su escasa representación areal y la 26 y 29 por no tener uso agrícola, quedando así conformada la base por 61 perfiles de suelo. De esta base de datos se tomó en cuenta la siguiente información: espesor (cm), porcentajes de arena, limo y arcilla, y la textura resultante, contenido de carbono orgánico (C [%]), capacidad de intercambio catiónico (CIC [cmol_c kg⁻¹]) y densidad aparente (Mg m⁻³) de 192 horizontes de los 61 perfiles. Los valores de densidad aparente fueron estimados siguiendo la metodología propuesta por Rawls (1983). A cada suelo se le asignó la proporción del área de la unidad de mapeo que ocupa.

Finalmente, la base de datos se completó con información publicada e inédita de 10 suelos independientes (Tabla 2). Estos suelos cuentan, además de la información edáfica básica, con los contenidos de humedad retenida a -33 kPa y -1500 kPa en los 38 horizontes de los 10 perfiles. Los suelos se distribuyen en la casi totalidad de las unidades geomorfológicas de la región pampeana, y son representativos de los principales Sub-Grupos (7 de un total de 15 casos) y unidades de mapeo (42 % de los 24 casos) (Tabla 1). Esta información fue utilizada en la validación y elección de FPT (objetivo a).

Funciones de pedo-transferencia

Dado el carácter empírico de FPT, su elección se basó en: i) atributos edáficos disponibles o estimados de la cartografía de suelo, ii) representatividad de una unidad geomorfológica, e iii) calibración local. En la Tabla 3 se presentan los métodos seleccionados y el dominio de suelos donde se aplican. A los fines de contar con un mar-

co de referencia, se incluyó en la validación el modelo de Rawls *et al.* (1982) (método 4). Además de haber sido desarrollado a partir de una gran base de datos de suelos de EE.UU, este método resultó el mejor modelo de estimación entre las seis FPT más difundidas (Kern 1995). Los cuatro métodos empleados tienen en común ser modelos de regresión lineal múltiple de la forma:

$$\Theta_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_n X_{ni} \quad [1]$$

donde Θ es el contenido de agua volumétrico ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) del horizonte i , $\beta_{0,1,2,n}$ los coeficientes lineales de la FPT y X_i las variables edáficas o la misma variable transformada. Los modelos difieren en los coeficientes y variables, producto de los datos experimentales empleados. Todos los métodos emplean el espesor de cada horizonte y la textura como variables independientes. Los métodos de Pecorari *et al.* (1988) y Rawls *et al.* (1982) emplean tam-

bién la materia orgánica, el de Travasso y Suero (1994) el $\Theta_{-33 \text{ kPa}}$ estimado, y el de Damiano *et al.* (1996) la actividad de la arcilla estimada por la capacidad de intercambio catiónico. Los algoritmos básicos de los cuatro modelos de retención de agua del suelo son presentados en la Tabla 4.

Estimación de capacidad de agua disponible para la planta con FPT

Con los valores de Θ a los potenciales de -33 kPa y -1500 kPa por horizonte i del suelo k se calculó la capacidad de agua disponible para la planta (CADP):

$$CADPk = \sum_{i=1}^n s_i * (\Theta_{33} - \Theta_{1500})_i \quad [2]$$

siendo s el espesor y n la cantidad de horizontes. La suma de todos los horizontes resultó en la lámina de agua disponible (mm). Si bien las raíces de los principales cultivos pueden superar los dos

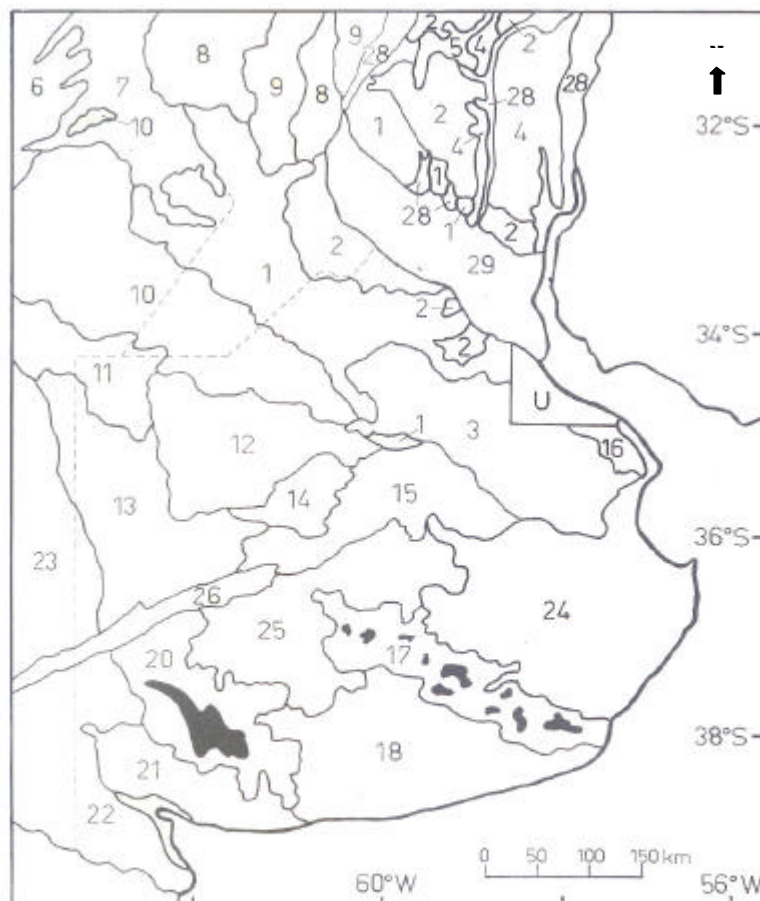


Figura 2. Principales asociaciones de suelo de la región pampeana y áreas adyacentes. Las asociaciones de suelo se identifican en la Tabla 1. Fuente: Hall *et al.* (1992).

Figure 2. Main soil associations of the pampean region and adjacent areas. Soil associations are identified in Table 1. Extracted from Hall *et al.* (1992).

Tabla 1. Principales asociaciones de suelo de la región pampeana y áreas adyacentes agrupadas por unidad geomorfológica. Para ubicación en subregiones y distribución geográfica ver Figuras 1 y 2, respectivamente.
 Table 1. Main soil associations of the pampean region and adjacent areas as grouped by geomorphological units. Their location in subregions and their geographical distribution can be found in Fig. 1 and 2, respectively.

Unidad Geomorfológica	Asociaciones de Suelo
<i>Región Pampeana</i>	<i>SubGrupos en orden de dominancia</i>
A. Pampa Ondulada	1. Argiudoles Típicos 2. Argiudoles Vérticos 3. Argiudoles Ácuicos, Argiudoles Típicos, Hapludoles Tpto Árgicos 16. Cromudertes Típicos
B1. Pampa Interior Plana	10. Hapludoles Énticos, Hapludoles Típicos, Haplustoles Énticos 11. Hapludoles Tpto Árgicos, Hapludoles Típicos, Haplustoles Udorténticos. 12. Hapludoles Énticos, Hapludoles Tpto Árgicos, Hapludoles Típicos 14. Hapludoles Tpto Árgicos, Hapludoles Énticos 15. Hapludoles Énticos, Hapludoles Tpto Árgicos, Hapludoles Tpto Nátricos 26. Sistema de lagunas encadenadas
B2. Pampa Interior Occidental	13. Hapludoles Énticos, Hapludoles Típicos 23. Haplustoles Énticos, Haplustoles Típicos, Hapludoles Énticos
C. Pampa Austral	17. Argiudoles Típicos, Argiudoles Ácuicos, Hapludoles Petrocálcicos 18. Argiudoles Típicos Someros, Argiudoles Típicos 20. Argiudoles Típicos, Argiudoles Típicos Somero, Hapludoles Petrocálcicos
D. Pampa Inundable	24. Hapludoles Tpto nátricos, Hapludoles Tpto Argicos 25. Hapludoles Tpto Nátricos, Argiudoles Típicos Someros
E. Pampa Mesopotámica	4. Peludertes Argiudólicos 5. Ocracualfes Típicos 28. Udifluventes Óxicos, Argiudoles Ácuicos, Haplumbreptes Fluvénticos
<i>Area Adyacente</i>	
Pampa Loéssica Alta (Cba.)	6. Haplustoles Énticos
Pampa Loéssica Plana	7. Argiudoles Típicos
Pampa Llana Santafesina (S. Fe)	8. Argiudoles Típicos, Argiudoles Ácuicos
Bajos Submeridionales	9. Argiudoles Ácuicos, Argiudoles Típicos
Pampa Semiárida Bonaerense (Bs. As.)	21. Haplustoles Típicos, Argiustoles Típicos 22. Haplustoles Énticos, Calciustoles Petrocálcicos, Haplustoles Arídicos.
Depósitos aluviales U: Area Urbana	29. Complejo aluvial

Tabla adaptada de Hall *et al.* (1992).

metros en suelos sin limitantes (Fagioli 1973), en general, se acepta una profundidad efectiva de almacenaje y consumo por el vegetal de un metro (Batjes 1996). En los perfiles de suelo con limitantes al sistema radical, como ser: mecánica (tosca o roca), textural (horizontes B argílicos muy arcillosos y propiedades vérticas), química (sodio de intercambio) y/o hídrica (hidromorfismo o per-

meabilidad) se restringió la profundidad a valores acordes con la profundidad de la limitante en cuestión. Los suelos de la Pampa Ondulada con horizontes Bt con elevados porcentajes de arcilla pueden afectar la velocidad de elongación de las raíces de cultivos de maíz, limitando el desarrollo y consecuentemente el aporte de agua y nutrientes en períodos críticos como la floración (Otegui *et*

Tabla 2. Unidades taxonómicas de suelo empleadas en la validación y selección de funciones de pedo-transferencia de aplicación en la región pampeana y áreas adyacentes

Table 2. Soil taxonomical units used to validate and select pedo-transfer functions suitable to the pampean region and adjacent areas.

Unidad	Suelo		Unidad de Mapeo	Ubicación	
	SubGrupo			Latitud Sur	Longitud Oeste
M. Juárez	Argiudol	Típico	1	32° 35'	62° 05'
Roldán	Argiudol	Vértico	2	32° 43'	60° 55'
San Claudio	Hapludol	Típico	12	35° 27'	61° 14'
Anguil	Haplustol	Árido	23	36° 30'	63° 49'
Balcarce	Argiudol	Típico	17	37° 45'	58° 18'
Udaondo	Hapludol	Tapto Árgico	24	35° 26'	57° 55'
Ramblones	Peluderte	Argiudólico	4	30° 31'	59° 16'
Oncativo	Haplustol	Éntico	6	31° 57'	63° 44'
Monte Buey	Argiudol	Típico	7	32° 56'	62° 22'
Los Cardos	Argiudol	Típico	9	32° 20'	61° 40'

al. 1995). Esta limitación se manifiesta particularmente cuando el suelo se encuentra húmedo, y no cuando está seco y con grietas (Prystupa, Lemcoff 1998). Pecorari, Balcaza (1988) informaron que el 93% de las raíces de un cultivo de maíz se halla entre 0 y 60 cm. A resultados similares llegaron Wilson, Valenzuela (1998) en un suelo Argiudol Vértico de Entre Ríos, cultivado con trigo.

La CADP por unidad de mapeo u se obtuvo como:

$$CADPu = \sum_{k=1}^m p_k * CADPk \quad [3]$$

donde p es la proporción entre el área del suelo k y el total de la unidad u ; m es el número de suelos de la unidad.

Las unidades de suelo no pueden ser delineadas a la escala 1:500 000, por lo que se las agrupó, entonces, en unidades de mapeo diferenciando la lámina de agua en el perfil y en la

capa arable (horizontes Ap y A). La presentación espacial (mapa temático) de los valores de CADPu (objetivo b) fue construida mediante la confección de una grilla con variograma lineal (procedimiento *Krigging*), sobre unidades de mapeo del área de influencia de 35 estaciones meteorológicas de la región pampeana (INTA, Servicio Meteorológico Nacional) y dos localidades de la provincia de Entre Ríos. El mapa, definido por un conjunto de líneas de igual valor, fue finalmente impreso con el programa Surfer v. 5.0 (Surface Mapping System 1993).

RESULTADOS Y DISCUSION

Validación y selección de modelos de regresión lineal múltiple

Los valores de CADP estimados por todos los métodos y los observados por los diferentes autores variaron, en línea general,

Tabla 3. Modelos de retención hídrica calibrados para suelos agrícolas de la región pampeana

Table 3. Water retention models calibrated for agricultural soils of the pampean region.

Método	Unidad Geomorfológica de Aplicación	GranGrupo de Aplicación	Calibración R^2	n
1. Pecorari <i>et al.</i> (1988)	Pampa Ondulada	Argiudoles y Hapludoles	0,38-0,86	45
2. Travasso, Suero (1994)	Pampa Austral	Argiudoles	0,70-0,74	151
3. Damiano <i>et al.</i> (1996)	Pampa Ondulada y Pampa Interior Plana	Argiudoles y Hapludoles	0,88-0,90	36

n, cantidad de horizontes

Tabla 4. Coeficientes y variables de los algoritmos básicos de cuatro modelos de retención de agua del suelo.
Table 4. Coefficients and basic algorithms of four soil water retention models.

Modelo	Potencial mátrico kPa	Ecuaciones paramétricas
1. Pecorari <i>et al.</i> (1988)	-33 (a) -33 (b) -1500 (c) -1500 (d)	$\Theta = 6,85 + 0,360 * (C + LF)$ $\Theta = 4,36 + 0,430 * (C + LF)$ $\Theta = 5,89 + 0,341 * C + 0,036 * LF + 0,235 * MO$ $\Theta = 4,04 + 0,252 * C + 0,206 * LF$
2. Travasso, Suero (1994)	-33 [33-1500]	$\Theta = 5,5868 + 0,61 * C + 0,203 * LF$ [1] $\Theta = -0,0686 + 0,476 * [1]$
3. Damiano <i>et al.</i> (1996)	-33 -1500	$\Theta = 0,3718 - 0,0029 * A + 1,1836 * (1/A)$ $\Theta = 0,0233 + 0,0042 * C - 0,9636 * (1/C) + 0,1318 * AA$
4. Rawls <i>et al.</i> (1982)	-33 -1500	$\Theta = 0,2576 - 0,002 * A + 0,0036 * C + 0,0299 * MO$ $\Theta = 0,026 + 0,005 * C + 0,0158 * MO$

Θ : contenido de agua, % en peso (método 1: a y c, horizonte superficial; b y d, horizonte subyacente), % en volumen (método 2), cm³/cm³ (métodos 3 y 4); C: arcilla, < 2 μ m (%); LF: limo fino, 2-20 μ m (%); A: arena, 50-2000 μ m (%); MO: materia orgánica, % [CO * 1,73]; AA: actividad de la arcilla; método 1: % en volumen [% en peso * densidad aparente en Mg m⁻³].

según la textura y la profundidad del perfil (Tabla 5). Los suelos de textura fina (M. Juárez, Oncativo, Monte Buey y Los Cardos) tuvieron mayor disponibilidad de agua que (i) los suelos de textura gruesa (Anguil, San Claudio) y (ii) los suelos de textura fina con limitantes en la zona radical (Roldán, Ramblones). En situación intermedia se ubicaron los suelos de textura media (Balcarce, Udaondo).

El grado de precisión, medido a través

de error relativo (ER) constituye el paso previo en la elección de FPT. El ER absoluto para el conjunto de suelos osciló entre 16 y 28 % (rango 1 a 49 %), con excepción del método 3 (Damiano *et al.* 1996), cuyo error fue 56 % (rango 5 a 224 %). Como ningún método fue superior en todos los casos, el agrupamiento de los suelos según su clase textural mejoró el nivel de precisión. Los métodos 1 (Pecorari *et al.* 1988) y 4 (Rawls *et al.* 1982) fueron más

Tabla 5. Estimación de la capacidad de almacenaje de agua disponible en series de suelo de la región pampeana y áreas adyacentes

Table 5. Estimation of available soil water in Soil Series of the pampean region and adjacent areas.

Unidad	Capacidad de agua disponible para la planta estimada por					
	Pecorari	Travasso	Damiano	Rawls	Observado	Profundidad
	mm				cm	
M. Juárez	183	142	310	193	159	100
Oncativo	159	99	291	195	166	100
Monte Buey	159	128	194	177	204	100
Los Cardos ⁽¹⁾	281	181	221	225	280	100
Roldán	77	56	269	89	83	40
Ramblones	55	56	100	86	83	39
Balcarce	109	129	82	139	174	100
Udaondo	64	94	123	118	91	70
San Claudio ⁽²⁾	348	262	272	309	292	100
Anguil	60	43	62	61	84	62

Lámina de agua retenida a -1500 kPa (1) y -33 kPa (2)

Tabla 6. Estimación de la capacidad de agua disponible (lámina en mm) en el perfil y en la capa arable para las principales asociaciones de suelo agrícola que conforman las distintas unidades geomorfológica de la región pampeana y áreas adyacentes

Table 6. Estimation of available soil water [water depth in mm] in soil profile and the plow layer, in the main Soil Associations of geomorphological units of the pampean region and adjacent areas.

Unidad de Mapeo	Capacidad de agua disponible		Profundidad del Perfil cm
	Perfil	Capa arable	
	mm		
1. Pampa Ondulada	169	32	95
2.	58	37	33
3.	90	27	73
16	49	26	40
10. Pampa Interior Plana	69	32	66
11.	82	33	85
12.	81	31	79
14	92	32	89
15.	78	32	66
13. Pampa Interior Occidental	82	32	71
23.	43	23	43
17. Pampa Austral	109	35	76
18.	111	27	88
20.	78	27	57
24. Pampa Inundable	67	32	61
25	69	24	56
4. Pampa Mesopotámica	55	29	39
28.	72	21	67
6. Pampa Loéssica Alta	158	41	100
7. Pampa Loéssica Plana	159	35	100
8. Pampa Llana Santafesina	165	40	78
9. Bajos Submeridionales	102	39	52
21. Pampa Semiárida Bonaerense	77	27	53
22.	36	14	68

precisos (error = 13 %) en suelos de textura franco limosa a arcillo limosa (valores sombreados en la Tabla 5). En el extremo opuesto a este grupo textural se ubicó el método 3 (Damiano *et al.* 1996), cuyo error fue 73 %. Este método sobrestimó el contenido de humedad retenido a -33 kPa en la Serie Roldán (arena < 3 %), y subestimó el retenido a -1500 kPa en la Serie Oncativo (arcilla < 16 % y limo > 65 %). En cambio, el modelo 3 (Damiano *et al.* 1996) estimó adecuadamente en las Series Monte Buey y Los Cardos, las cuales estuvieron dentro de su rango de calibración (Damiano *et al.* 1996). En suelos franco a franco arcillosos, el método 2

(Travasso, Suero 1994) superó claramente (error = 14 %) a los otros tres modelos. Lo propio hicieron los métodos 3 (Damiano *et al.* 1996) y 4 (Rawls *et al.* 1982) en suelos de textura franco arenosa a arena franca (ER= 16 %). Estos grados de precisión encuadran con los valores comúnmente aceptados con fines de modelización (Pachepsky *et al.* 1999), máxime si consideramos que los datos entre autores no son homogéneos debido a que aplicaron diferentes técnicas de medición. En síntesis, los métodos presentados respondieron mejor dentro del área del país donde fueron generados (Tabla 3). Por ello, este procedimiento textura - dependiente de

selección de FPT puede ser utilizado con cierto grado de confiabilidad para estimar la CADP en suelos pampeanos.

Estimación y caracterización espacial de la capacidad de agua disponible para la planta

Las unidades taxonómicas de suelos de la región pampeana y áreas adyacentes (Tabla 1) presentaron CADP entre 28 y 180 mm. El 31 % de los suelos (19 casos de un total de 61) tuvieron CADP entre 80 y 140 mm. Los valores inferiores a 50 mm (18 %) estuvieron asociados con perfiles poco evolucionados y contenido de arena mayor a 65 % (Haplustoles Enticos, Calciustoles Petrocálculos), o con espesores menores que 50 cm (Hapludoles Petrocálculos, Peludertes Argiudólicos, Hapludoles Tpto-Nátricos). Los valores mayores que 140 mm (19 %) se ubicaron en suelos bien desarrollados y sin restricciones al desarrollo del sistema radical (i.e. Argiudoles

Típicos).

Según surge de la Tabla 6, existe un gradiente hídrico vectorial de dirección SO-NE, que se corresponde con el material originario (grueso a fino) y las condiciones climáticas (semiárido a subhúmedo). Este contraste también se manifiesta al relacionar la lámina de agua de la capa arable con la del perfil, cuya relación fue 53 % en la Pampa Interior Occidental (unidad 23) y sólo 19 % en la Pampa Ondulada (unidad 1). Esta diferencia pone de manifiesto la influencia de la materia orgánica para aumentar la capacidad de retención de los suelos arenosos (Kern 1995; Villamil *et al.* 1997). En general, las CADP de las subregiones hídricas pampeanas y áreas adyacentes respondieron a: (i) la clasificación taxonómica en Sub-Grupos de suelo, (ii) la composición granulométrica en clases texturales, y (iii) las restricciones mecánicas en la zona radical. Estos resultados sugieren que la sensibilidad del procedimiento

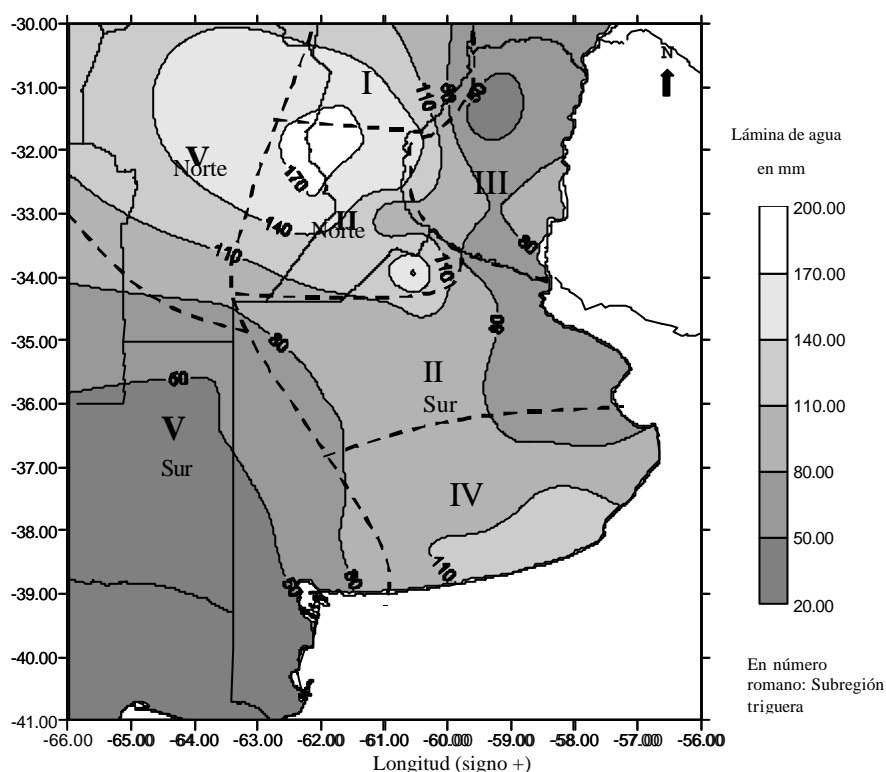


Figura 3. Distribución geográfica de la capacidad de agua disponible de suelos agrícolas en la región pampeana y áreas adyacentes. Límites de las regiones trigueras establecidas por la SAGPyA (- - -).

Figure 3. Geographical distribution of the available water in agricultural soils of the pampean region and adjacent areas. Limits of the wheat production regions were established by SAGPyA (- - -).

fue adecuada.

Mapa de capacidad de agua disponible para las plantas de suelos pampeanos

La presentación de un mapa temático de CADP en función de la distribución geográfica de unidades de mapeo plantea cierta discontinuidad entre límites (e.g. unidad 1 y 10). Este inconveniente se subsanó mediante la interpolación de 37 sitios que cubren la región pampeana en su totalidad. Las subregiones hídricas fueron sistematizadas en seis niveles con intervalos de 30 mm, para un rango que osciló entre 28 y 175 mm. Sin embargo, las variaciones temporales relacionadas con cambios en la vegetación y el manejo podrían causar variaciones en las propiedades hidráulicas comparables con las variaciones a escala regional (Pachepsky *et al.* 1999). El mapa de CADP de los suelos pampeanos se presenta en la Figura 3.

El tercio inferior (menor a 80 mm) se correspondió con la «subregión triguera V sur» (51 mm de promedio), que ocupa un 9 % de la superficie pampeana (5,2 Mha). El tercio superior (mayor a 140 mm) ocupa un 10 % de la superficie pampeana (5,8 Mha), y coincidió en casi su totalidad con la denominada «región núcleo maicera y II norte triguera» (129 mm), de reconocida productividad y marcada trascendencia en el contexto de la economía agrícola nacional. En la franja intermedia (80 a 110 mm) se ubicó la «subregión triguera IV» con una media de 102 mm, y un 18 % de la superficie pampeana (10,4 Mha). En la «subregión triguera III» (Entre Ríos) el gradiente hídrico entre las costas del río Paraná (Molisoles) y río Uruguay (Entisoles e Inceptisoles) fue de 80 mm (154 a 74 mm, respectivamente), pasando por los Vertisoles (28 a 55 mm). Anteriormente, en esta misma región, Falasca *et al.* (1997) no hallaron marcadas diferencias en el contenido de agua útil estimada por la FPT de Ritchie *et al.* (1987). Esta diferencia de estimaciones es un claro ejemplo de la mejor sensibilidad del procedimiento «Suelo-FPT-CADP» empleado en este trabajo. Recientemente, hemos comprobado que el método de Ritchie fue el peor entre cinco FPT validadas con suelos arenos franco a arcillosos representativos de la cuenca del río Arrecifes (provincia de Bs. As.)

(Damiano, Taboada 2000).

Los CADP de la capa arable mantuvieron el gradiente hídrico entre subregiones extremas (35 a 23 mm), pero las diferencias no fueron tan acentuadas como a nivel del perfil. Probablemente, ello se relaciona con las buenas propiedades físicas, químicas y biológicas del horizonte superficial de los Molisoles de la Pradera Pampeana. Sin embargo, debe considerarse que estas propiedades edáficas fueron relevadas hace casi tres décadas, cuando el uso y manejo de los suelos era menos intenso que el actual. Estudios recientes indican que hay sectores de las provincias de Buenos Aires, Córdoba, Santa Fe y Entre Ríos que están afectados por distintos procesos de erosión hídrica y eólica, y deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Ello afecta negativamente a propiedades edáficas determinantes de CADP. Por ejemplo, Barbosa *et al.* (1997) determinaron descensos de hasta 23 % en el contenido hídrico retenido a -33 kPa por el horizonte A de suelos limosos a causa de la degradación. Del mismo modo, en parcelas experimentales del área de influencia de la EEA Marcos Juárez de INTA, bajo diferentes sistemas de labranzas y cultivos por más de 20 años, se midieron láminas de agua al final del ciclo tan disímiles como 10 y 40 mm m⁻¹ (Thomas 1994). En la región semiárida, el exceso de laboreo y el sobrepastoreo afectan también negativamente a variables edáficas (e.g. densidad aparente, estabilidad estructural, porosidad total, resistencia mecánica), que inciden directamente en procesos (e.g. infiltración básica, escurrimiento, absorción de agua) relacionados con CADP (Villamil *et al.* 1997).

CONCLUSIONES

- a) Las ecuaciones de regresión lineal múltiple estimaron aceptablemente los límites de retención de agua, a partir de un mínimo de información disponible en la cartografía de suelo.
- b) Los valores estimados de capacidad de agua disponible en el perfil variaron con la textura y la profundidad de enraizamiento: (i) textura fina > (ii) textura media > (iii) textura gruesa = (iv) textura fina con limitantes en la zona radical.

- c) La capa arable es responsable de hasta un 50 % de la capacidad de agua disponible en suelos del oeste pampeano, y de sólo un 20 % en suelos de la Pampa Ondulada.
- d) Se construyó un mapa temático de capacidad de agua disponible para los cultivos en suelos pampeanos (escala 1:500 000), cuya información puede ser utilizada de ahora en más con fines de modelización del balance de agua.

REFERENCIAS

- Barbosa O A, Taboada M A, Rodríguez M B, Cosentino D J. 1997. Regeneración de la estructura en diferentes fases de degradación de un suelo franco limoso de la Pampa Ondulada (Argentina). *Ciencia del Suelo* 15: 81-86.
- Batjes N H. 1996. Development of a world data set of soil water retention properties using pedotransfer rules. *Geoderma* 71: 31-52.
- Damiano F, Díaz R A, Grondona M O. 1996. Evaluación de una función uni-parámetrica para la estimación de la curva de retención de agua en suelos agrícolas. *Actas del XVI Congreso Nacional del Agua*. San Martín de los Andes, Argentina. Trabajo N° 148.
- Damiano F, Taboada M A. 2000. Capacidad de agua disponible en suelos agrícolas de la Pampa Ondulada usando funciones de pedo-transferencia. *Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Mar del Plata, Argentina. Comisión I- N° 29.
- Fagioli M. 1973. Desarrollo de los aparatos radicales en cultivos de maíz y trigo en la región de Pergamino (Prov. de Buenos Aires). *Revista de Investigaciones Agropecuarias (INTA)*. Serie 2, *Biología y Producción Vegetal* 10: 111-135.
- Falasca S, Zabala S M, Bernabe M A, Ulberich A. 1997. Una metodología complementaria para el cálculo del balance hídrico en la provincia de Entre Ríos. *Revista Facultad de Agronomía* 17: 107-110.
- Hall A J, Rebella C M, Ghersa C M, Culot J Ph. 1992. Field-crop systems of the Pampas. p. 413-450. En: C.J. Pearson (Ed.). *Ecosystems of the Worlds*. Field Crop Ecosystems., Elsevier, Amsterdam.
- Kern J S. 1995. Evaluation of soil water retention models based on basic soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal* 59: 1134-1141.
- Klute A. 1986. Water Retention: Laboratory Methods. p: 635-662. En: A. Klute (ed.) *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods*, 2nd Ed. Agronomy N° 9, Madison, Wisconsin, USA.
- Otegui M E, Andrade E H, Suero E E. 1995. Growth, water use, and kernel absorption of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Research* 40: 87 - 94.
- Pachepsky Y A, Rawls W J, Timlin D J. 1999. The current status of pedotransfer functions: Their accuracy, reliability, and utility in field- and regional- scale modeling. En *American Geophysical Union, Assessment of non-point source pollution in the vadose zone*. Geophysical Monograph 108, 223-234.
- Pecorari C, Balcaza L F. 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 p.
- Pecorari C, Balcaza L F, Frutos E. 1988. Relaciones empíricas entre contenido de agua, textura y materia orgánica en suelos representativos de la Pampa Ondulada. Informe Técnico N° 212. EEA Pergamino. 32 p.
- Prystupa P, Lemcoff J H. 1998. Increased root density of maize crops under drought in a Typic Argiudoll. *Maydica* 43, 271 - 276.
- Rawls W J. 1983. Estimating soil bulk density from particle size analysis and organic matter content. *Soil Science* 135: 123-125.
- Rawls W L, Brakensiek D L, Saxton K E. 1982. Estimation of soil water properties. *Transactions of the ASAE* 25: 1316-1320.
- Ritchie J T, Ratliff L F, Cassel D K. 1987. Soil laboratory data, field descriptions and field measured soil water limits for some soils of the United States. *ARS Technical Bulletin*. USDA. 276 p.
- Surface Mapping System. 1993. *Surfer v. 5.0*. Golden Software, Inc. Golden, Colorado.
- Thomas G. 1994. Informe del estudio sobre humedad en parcelas de ensayos en la EEA Marcos Juárez. *Información para Extensión* N° 9 EEA M. Juárez. 21 p.
- Totis de Zeljkovich L E, Zeljkovich V J, Pérez O G. 1996. Manejo del agua de riego en el cultivo de maíz en la zona norte de la provincia de Buenos Aires. *Actas del 7º Congreso Argentino de Agrometeorología*. Buenos Aires. p.27-28.
- Travasso M I, Suero E E. 1994. Estimación de la capacidad de almacenaje de agua en suelos del sudeste bonaerense. *Boletín Técnico* N° 125. EEA Balcarce. 9 p.
- van Engelen V W P, Peters W L. 1995. Soils and terrain digital database for six countries in Latin America at scale 1:5 000 000 (SOTER-LA). I.S.R.I.C. Final Report. 22 p.
- Villamil M B, Amiotti N M, Peinemann N. 1997. Pérdida de fertilidad física en suelos del sur

del caldenal (Argentina) por sobrepastoreo.
Ciencia del Suelo 15: 102-104.
Wilson M G, Valenzuela O R. 1998. Evaluación

del sistema radical del cultivo de trigo mediante
dos métodos de medición. Revista Científica
Agropecuaria 2: 29-35.