

## EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE AGUA DE LOS SUELOS DE ANDALUCIA MEDIANTE EL ANÁLISIS DEL BALANCE MEDIO ANUAL DEL AGUA

K. Vanderlinden<sup>1</sup>, J. V. Giráldez<sup>2</sup> y M. Van Meirvenne<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Ríos y Embalses, CEAMA-Universidad de Granada, Avda. del Mediterráneo s/n, 18006 Granada, España - kvanderl@ugr.es

<sup>2</sup>Departamento de Agronomía, ETSIAM, Universidad de Córdoba, Apartado 3048, 14080 Córdoba, España - aglgicej@uco.es

<sup>3</sup>Dept. of Soil Management and Soil Care, Ghent University, Coupure 653, B-9000, Gent, Belgium - Marc.Vanmeirvenne@ugent.be

**RESUMEN.** La información sobre la capacidad de retención del agua en el suelo,  $w_o$ , es esencial para la evaluación regional del balance de agua, pero en general no se dispone de observaciones o estimaciones de este parámetro. En este trabajo se propone una metodología para elaborar un mapa de la  $w_o$  en Andalucía, empleando funciones de edafotransferencia y geoestadística. Las estimaciones de  $w_o$  son evaluadas en términos de la escorrentía total y la evapotranspiración real media anual, que se obtienen al aplicar un simple modelo para el balance de agua. Comparación de los resultados con otros estudios sugiere que la metodología propuesta subestima la  $w_o$  en un 45% en promedio.

**ABSTRACT.** Knowledge of the soil water holding capacity,  $w_o$ , is essential to the regional evaluation of the soil water balance, but this information is generally not available. In this work we propose a methodology to produce a map of  $w_o$  in Andalusia, using pedotransfer functions and geostatistics. The  $w_o$  estimates are evaluated in terms of the average annual total runoff and actual evapotranspiration, obtained with a simple bucket water balance model. Comparison of the results with other work shows that the proposed methodology underestimates  $w_o$  on average by 45%.

### 1. Introducción

La evaluación del balance del agua (BAS) de una región, requiere información sobre las propiedades de retención y transmisión de agua en suelo. Cuando se emplean modelos para evaluar el BAS a escala regional, esta información suele estar resumida en la capacidad de retención de agua del suelo,  $w_o$ , es decir, el intervalo de humedad volumétrica entre el punto de marchitez permanente,  $\theta_{PMP}$ , y la capacidad de campo,  $\theta_{CC}$ . Debido a la gran variabilidad espacial de las características de retención y transmisión de agua del suelo, sus observaciones carecen en general de un aceptable nivel de confianza (Kutilek y Nielsen, 1994). Además, en algunos casos existen

discrepancias importantes entre las mediciones en laboratorio y las observaciones en campo (Ratliff y col., 1983). Por estas razones se crearon las *funciones de edafotransferencia*, FET (Bouma, 1989), mediante las cuales se estiman estas propiedades a partir de otras propiedades que se pueden medir con más facilidad, como la textura, la densidad aparente ( $\rho_a$ ), el contenido en materia orgánica (MO), o el carbono orgánico (CO). Entre otros, Wösten y col. (2001) han revisado exhaustivamente las técnicas usadas para desarrollar FET y comentan su exactitud y fiabilidad. Procedimientos geoestadísticos permiten una interpolación óptima (Heuvelink y Webster, 2001) y la incorporación de información secundaria exhaustiva al elaborar un mapa de  $w_o$ . Esta información secundaria suele consistir en mapas de suelos o mapas litológicos. La manera más fácil para obtener un mapa de una propiedad edáfica es la cuantificación de la leyenda del mapa de suelos, mediante las observaciones disponibles de dicha propiedad. Si la clasificación es eficaz, la varianza de las clases individuales será inferior a la varianza total de la propiedad. Según Leenhardt y col. (1994), la clasificación de mapas de suelos suele ser de escaso valor predictivo si el criterio para la clasificación no coincide con la propiedad del suelo que se quiere estimar, o no está relacionado de algún modo con ella. En este trabajo se propone una metodología para la elaboración de un mapa de  $w_o$  de Andalucía. Dado que no se dispone de observaciones de esta propiedad, sino solamente de valores de propiedades edáficas básicas (Trueba y col., 1999), se ha recurrido a FET para calcularla. Después se interpolan estas estimaciones, teniendo en cuenta el mapa de suelos de Andalucía (C.S.I.C.- I.A.R.A., 1989) como información secundaria. Finalmente se comprueba el mapa de suelos a través de un modelo simple para el balance medio anual del agua en Andalucía y se propone una posible corrección.

## 2. Material y métodos

### 2.1. La FET

Schaap y col. (1998) desarrollaron una FET usando redes neuronales para la predicción de los parámetros de la curva de retención (modelo de van Genuchten) y otros parámetros hidráulicos a partir de una amplia base de datos. La metodología está implementada en un programa informático llamado *Rosetta* (Schaap y col., 2001), de libre disposición en la red. El programa ofrece la posibilidad de usar 5 diferentes FET, según la disponibilidad de los datos de entrada, para estimar los parámetros del modelo de van Genuchten.

### 2.2. Metodología de la regionalización de la $w_o$

Empleando la FET anteriormente descrita, se obtienen estimaciones puntuales de la  $w_o$ , pero el análisis regional del BAS requiere estimaciones de la  $w_o$  en todos los puntos de una malla regular que cubre toda la región. La solución más obvia y simple es la cuantificación de mapas de suelos (Wösten y col., 1999). Cuanto más pequeña es la variabilidad residual dentro de las diferentes clases, mejor es la clasificación y mayor es la exactitud del mapa final, suponiendo siempre que las clases se pueden relacionar bien con la variable cuantitativa (Heuvelink y Webster, 2001). Otra alternativa es la interpolación geoestadística (Goovaerts, 1997), que estima de manera óptima (libre de sesgo y varianza mínima) la  $w_o$  en los nodos de una malla regular, teniendo en cuenta su correlación espacial. Cuando se dispone de información adicional sobre la distribución espacial de la variable bajo estudio, como p.ej. mapas de suelo o de textura, es recomendable incorporar esta información en el procedimiento de interpolación (Heuvelink y Webster, 2001). Cuando se usan FET para calcular las propiedades hidráulicas del suelo existen dos vías de trabajo alternativas (Heuvelink y Pebesma, 1999): (I) Interpolan las propiedades básicas y después calcular las propiedades deseadas mediante la FET, o (II) aplicar la FET en los puntos donde se dispone de datos, e interpolar los resultados, ya sean parámetros de algún modelo para la curva de retención o las propiedades hidráulicas deseadas. Según el procedimiento I habría que interpolar primero el contenido en arcilla, limo, arena, MO y elementos gruesos para cada horizonte por separado. Sin embargo el espesor de los horizontes varía espacialmente, lo que oscurece la uniformidad de los datos y la estructura de su correlación espacial. La única alternativa sería calcular un valor medio de estas propiedades hasta una profundidad de 1m, interpolarlos, aplicar la FET y calcular la  $w_o$ . Sin embargo, por razones pragmáticas, se ha adoptado en este estudio el procedimiento II donde se calcula para cada perfil la  $w_o$  y después se interpola esta información en una malla regular.

El krigeado simple con media local variable (KSml) (Goovaerts, 1997) ofrece la posibilidad de tratar la inestacionariedad de los datos:

$$z_{KSml}^*(x_o) = m(x_o) + \sum_{i=1}^n \lambda_i^{KSml} (z(x_i) - m(x_i)) \quad (1)$$

siendo  $m(x_o)$  y  $m(x_i)$  la media local conocida, respectivamente en el punto a estimar,  $x_o$ , y en los puntos vecinos,  $x_i$ ;  $z(x_i)$  son los valores en los puntos vecinos y  $\lambda_i^{KSml}$  son los factores de ponderación que se obtienen mediante la resolución del sistema de ecuaciones de krigeado simple usando el semivariograma residual. Se emplea el mapa de suelos cuantificado como  $m(x)$ . Este procedimiento está implementado en GSLIB, el conjunto de programas Fortran de Deutsch y Journel (1998).

### 2.3. Evaluación mediante el balance medio anual del agua

El balance medio anual del agua en el suelo explica cómo se reparte la precipitación en escorrentía y evapotranspiración a lo largo del año:

$$P = E + Q, \quad (2)$$

siendo  $P$ ,  $Q$  y  $E$  los totales anuales de precipitación, escorrentía total (superficial y subterránea) y evapotranspiración real, respectivamente. Partiendo de esta ecuación y de relaciones empíricas entre  $E$  y  $P$  o  $Q$  y  $P$  (Brutsaert, 1982), junto con un modelo simple para el balance diario del agua en el suelo (Milly, 1994a, 1994b), se puede evaluar espacialmente el balance medio anual del agua en Andalucía. En este modelo se considera el suelo como un depósito con una finita capacidad de almacenamiento de agua,  $w_o$ , que se suministra por la lluvia y que se pierde por la evapotranspiración. La evapotranspiración siempre ocurre al ritmo potencial y cuando el recipiente se desborda, ocurre escorrentía. Comparando los resultados de este análisis para Andalucía con fuentes bibliográficas, se puede evaluar la bondad de la estimación de  $w_o$ .

### 2.4. Los datos edafológicos y el mapa de suelos de Andalucía

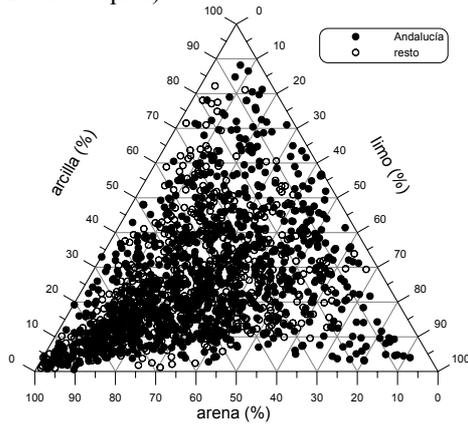
El punto de partida del presente análisis de la  $w_o$  en Andalucía ha sido la base de datos de propiedades edafológicas de los suelos españoles (Trueba y col., 1999) y el mapa de suelos de Andalucía (C.S.I.C.-I.A.R.A., 1989). En total se han retenido 1655 horizontes, pertenecientes a 521 perfiles, de los cuales 319 (1015 horizontes) se sitúan dentro de Andalucía y 202 (640 horizontes) en las provincias colindantes. Solamente se han empleado los perfiles que disponían de las coordenadas y el porcentaje de arena, limo, arcilla y materia orgánica. El mapa de suelos de Andalucía (C.S.I.C. - I.A.R.A., 1989) agrupa los suelos en unidades cartográficas, caracterizadas por asociaciones y complejos taxonómicos siguiendo los criterios del mapa de suelos del mundo y el mapa de suelos de la Comunidad Europea.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Análisis exploratorio de los datos

No es posible procesar los datos según la profundidad o el espesor del horizonte, dado que estos son diferentes en cada perfil. La figura 1 muestra el triángulo de textura para los horizontes que pertenecen a Andalucía y las provincias

colindantes. Existe una gran variedad en la granulometría de los suelos, de tal modo que todas las clases texturales según la clasificación del USDA aparecen. La tabla 1 muestra los estadísticos descriptivos para las tres clases granulométricas (arcilla, limo y arena), el contenido en MO y elementos gruesos, >2 mm, (EG). Todas las propiedades consideradas tienen una distribución sesgada, excepto el contenido en arena. Sobre todo la distribución de MO muestra un sesgo importante, que se debe al gran número de observaciones inferiores al 1 %, y a la ocurrencia de algunos valores muy elevados (provenientes de turberas o bosques).



**Fig. 1.** Contenido en arcilla (0-2 µm), limo (2-50 µm) y arena (50-2000 µm) de los 1655 horizontes retenidos de la base de datos de Trueba y col. (1999), 1015 se sitúan dentro de Andalucía y 640 pertenecientes a las provincias colindantes.

**Tabla 1.** Estadísticos descriptivos de algunas propiedades edafológicas, para los 1015 horizontes de Andalucía, obtenidas de la base de datos de Trueba y col. (1999).

(%)	<i>m</i>	<i>med</i>	<i>s</i>	<i>s</i> <sup>2</sup>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>sesgo</i>	<i>curt</i>
arcilla	25,5	22,0	17,3	300,6	0,6	88,2	0,93	0,47
limo	27,3	24,1	17,6	311,3	0,1	91,1	0,91	0,64
arena	47,1	47,4	24,1	582,3	0,5	96,5	0,03	-0,94
MO	1,8	1,0	2,9	8,5	0,1	57,5	8,87	140,14
EG*	30,3	26,5	24,7	612,7	0,1	89,0	0,54	-0,82

\*EG: elementos gruesos, n = 277

Se ha calculado la  $w_o$  (mm), para el perfil entero, mediante la siguiente expresión:

$$w_o = \sum_{h=1}^H \Delta\theta_h \left(1 - \frac{EG_h}{100}\right) D_h, \quad (3)$$

siendo  $\Delta\theta_h$  el intervalo de humedad volumétrica, entre CC y PMP, para el horizonte  $h$  del perfil;  $EG_h$ , el porcentaje de elementos gruesos en el horizonte  $h$ ; y  $D_h$  el espesor (mm) del horizonte  $h$  en el perfil. H es el máximo número de horizontes de cada perfil. La  $w_o$  solamente ha sido evaluada hasta una profundidad de 1 m. Sus estadísticos descriptivos se recogen en la tabla 2.

Se puede ver que los estadísticos son muy similares tanto cuando se consideran todos los perfiles, como cuando se consideran sólo los de Andalucía, por lo que se puede justificar el tratamiento conjunto de los 521 datos.

**Tabla 2.** Estadísticos descriptivos para la  $w_o$ , calculada a partir de la información de 319 perfiles en Andalucía y 202 en provincias colindantes.

<i>m</i>	<i>med</i>	<i>s</i>	<i>s</i> <sup>2</sup>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>sesgo</i>	<i>curt</i>
<i>Andalucía + provincias colindantes (521 perfiles)</i>							
110,5	114,7	48,1	2311,7	0,4	234,9	-0,20	-0,09
<i>Andalucía (319 perfiles)</i>							
108,9	113,7	49,8	2485,5	0,4	234,9	-0,16	-0,27

### 3.2. Regionalización de la $w_o$

Una primera alternativa para la regionalización de la  $w_o$  es clasificarla según el mapa de suelos de Andalucía. Se puede evaluar la eficacia de la clasificación mediante el complemento de la varianza relativa *CVR* (Leenhardt y col., 1994):

$$CVR = 1 - \frac{s_D^2}{s_T^2} \quad (4)$$

siendo  $s_D^2$  y  $s_T^2$  las estimaciones de la varianza *dentro* y *entre* las clases, respectivamente. La tabla 3 muestra la eficacia de diferentes posibilidades de estratificación (según las clasificaciones texturales (*T*) y taxonómicas) de la  $w_o$  en términos del *CVR*. La clasificación textural según el USDA da los mejores resultados. La última columna muestra la eficacia de la clasificación según las provincias y sirve de referencia como clasificación casi aleatoria, cuya *CVR* debería de aproximarse a cero

**Tabla 3.** Evaluación de diferentes estrategias para clasificar la  $w_o$  según el complemento de la varianza relativa (*CVR*).

<i>T</i> <sub>FAO3</sub>	<i>T</i> <sub>FAO5</sub>	<i>T</i> <sub>USDA</sub>	<i>FAO1</i>	<i>FAO2</i>	<i>USDA</i>	<i>Provincia</i>
0,24	0,31	0,52	0,24	0,27	0,07	0,06

La clasificación taxonómica según el USDA da similares resultados a la clasificación según las provincias, lo que demuestra el escaso valor de esta clasificación para estimar la  $w_o$ . Para evaluar la parte de la varianza de la  $w_o$  que se puede explicar mediante la clasificación del mapa de suelos de Andalucía (C.S.I.C.-I.A.R.A., 1989) hay que clasificar los 314 perfiles según las 64 unidades cartográficas de este mapa. También se dispone del tipo de suelo predominante y de tipos de suelos asociados a cada unidad, o de la litología predominante en cada unidad. A partir de esta información se ha elaborado la tabla 4, donde se representa el *CVR* para la  $w_o$  según la clasificación en unidades cartográficas, la clasificación FAO, las clases litológicas y, como punto de comparación, la clasificación según las 8 provincias.

**Tabla 4.** Evaluación de diferentes alternativas para clasificar la  $w_o$  según el mapa de suelos de Andalucía (C.S.I.C.-I.A.R.A., 1989) mediante el complemento de la varianza relativa (*CVR*).

<i>unidades</i>	<i>clasif. FAO</i>	<i>litología</i>	<i>provincias</i>
0,09	0,08	0,16	0,01

La capacidad predictiva del mapa de suelos, en cuanto a  $w_o$ , es muy pequeña. Los valores de *CVR* para la clasificación según las unidades y según la clasificación

FAO son tan bajos, que estas clasificaciones no son útiles para predecir la CRAS. Sin embargo en muchas ocasiones se usan para estimar propiedades hidráulicas del suelo porque constituyen la única fuente de información de la que se dispone. Solamente la clasificación según la litología parece aportar alguna información. Se necesitaría un mapa de suelo más detallado, con mayor escala, para poder compararlo con datos puntuales (Leenhardt y col, 1994).

La figura 2 muestra el mapa obtenido al cuantificar la leyenda del mapa litológico con la  $w_o$  media de cada clase.

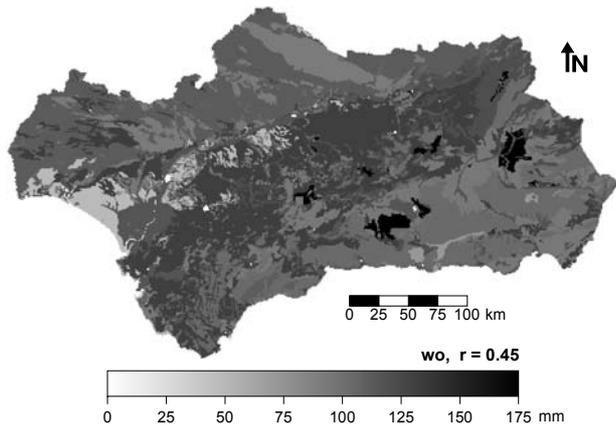


Fig. 2. Mapa de la  $w_o$  elaborado a partir del mapa de suelos de Andalucía, cuantificando las clases litológicas.

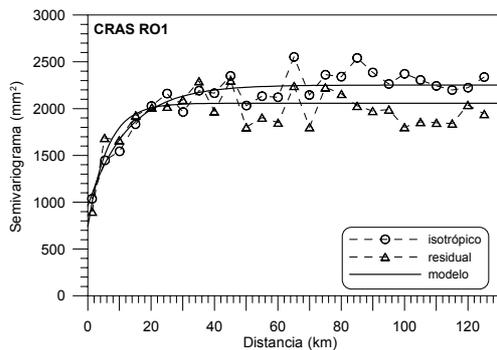


Fig. 3. Semivariograma isotrópico y residual, junto con el modelo ajustado.

La figura 3 representa los semivariogramas muestrales isotrópicos y residuales, junto con los modelos exponenciales ajustados. Se ha empleado el programa VARIOWIN v2.2 (Pannatier, 1996) para el cálculo de los semivariogramas muestrales y para el ajuste de los modelos. Ambos semivariogramas son muy similares. La pequeña diferencia entre las mesetas de ambos semivariogramas demuestra que el mapa de la figura 2 aportará poca información a la estimación de la  $w_o$  mediante KSml en bloques de  $1 \times 1$  km, cuyo resultado se muestra en la figura 4.

### 3.3. Influencia de $w_o$ en el BAMA y validación

Se han calculado las medias anuales de los componentes del balance de agua,  $E$  y  $Q$ , mediante el modelo de Milly, en 160 estaciones meteorológicas, sin calibración. La tabla 5 muestra los estadísticos descriptivos de estos datos. La

varianza de  $E$  aumenta cuando se duplica  $w_o$  y su valor medio aumenta un 13%.

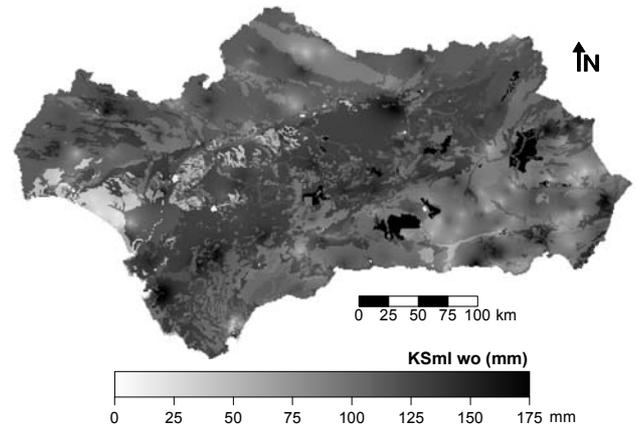


Fig. 4. Mapa de la  $w_o$ , elaborado mediante KSml en bloques de  $1 \times 1$  km, con el mapa litológico cuantificado como media local variable.

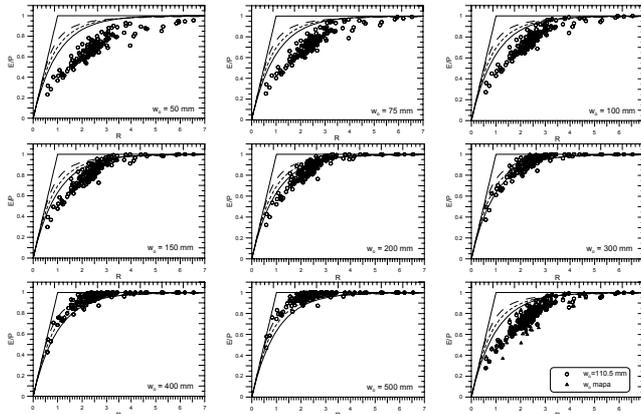
Tabla 5. Estadísticos descriptivos para los componentes del balance medio anual en 160 observatorios en Andalucía, calculados mediante el modelo de Milly.

$n=160$	$m$	$med$	$min$	$max$	$s$	$s^2$	$sesgo$	$curt$
(mm)								
$w_o$ original								
$E$	408,6	416,8	208,4	610,4	75,0	5627,6	-0,4	0,5
$Q$	164,1	120,4	0,0	1418,7	188,8	35665,7	3,4	15,6
$w_o \times 2$								
$E$	463,9	469,4	208,7	753,8	100,7	10139,4	-0,2	0,4
$Q$	107,5	58,5	0,0	1302,8	167,9	28186,8	3,9	20,3

$m$ : promedio,  $med$ : mediana,  $min$ : mínimo,  $max$ : máximo,  $s$ : desviación típica,  $s^2$ : varianza,  $curt$ : curtosis

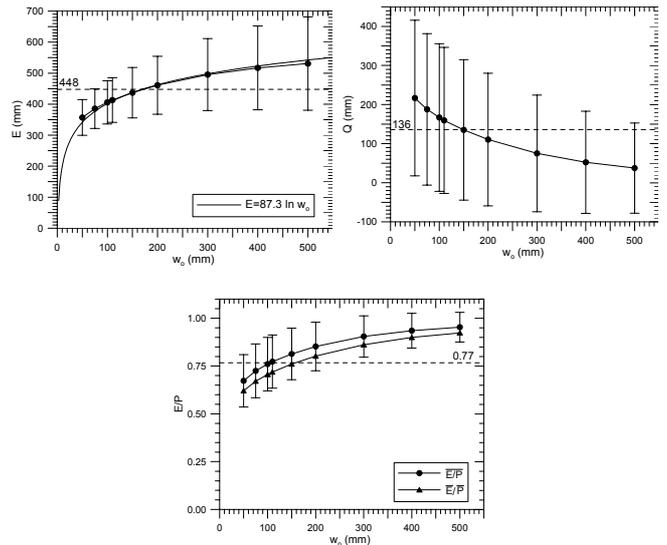
Los datos de  $Q$  resultan muy sesgados, debido al gran número de estaciones donde se observa anualmente muy poca escorrentía y al pequeño número de estaciones donde se genera mucha escorrentía. Este efecto se debe a la limitada  $w_o$ , a la elevada precipitación, o a la interacción de ambos. Duplicando  $w_o$  se reduce la variabilidad de  $Q$  y disminuye su media un 35%. En la figura 5 se ha representado el balance medio anual en 160 observatorios en Andalucía, junto con las ecuaciones empíricas de Budyko, para valores de  $w_o$  entre 50 y 500 mm. Las asíntotas a las curvas de Budyko reflejan un balance con limitación de energía y limitación de agua (horizontal). Cuando se emplea la  $w_o$  del mapa, las diferencias con las curvas empíricas se deben, por un lado, a la importante estacionalidad que muestra el clima en Andalucía, con un desfase completo entre la precipitación y la  $ET_o$  (Milly, 1994b); por otro, a la relativamente baja  $w_o$  que se ha estimado para Andalucía,  $\bar{w}_o = 110$  mm, frente a valores entorno a 150 mm, empleados por Milly (1994a, 1994b). También otras fuentes, como el *Libro Blanco del Agua en España*, LBAE, (MMA, 1998; Monreal y col., 1999), emplean valores de  $w_o$  más grandes. Resulta interesante evaluar las consecuencias de la posible subestimación de  $w_o$  en cuanto al balance medio anual del agua en Andalucía. Para valores de  $w_o$  hasta 150 mm, la relación

entre  $E/P$  y  $R$  se aproxima bastante a la solución analítica de Milly (1994a), considerando sólo la variación estacional (función senoidal) de la precipitación y de la evapotranspiración de referencia, lo que corresponde con las características de la climatología de Andalucía. Este tipo de climatología explicaría, en sí, la desviación negativa de las curvas empíricas de Budyko, según Milly (1994b).



**Fig. 5.** Diagrama de Budyko para diferentes valores de  $w_o$ . Obsérvese como se pueden ajustar los datos a las relaciones empíricas de Budyko, cambiando solamente el valor de  $w_o$ .

Otro aspecto de  $w_o$  que no se ha tenido en cuenta es su variabilidad espacial. Milly y Eagleson (1987) analizan este problema usando el modelo estadístico-dinámico del segundo autor y concluyen que, la variabilidad espacial de  $w_o$  solamente tiene un efecto significativo en el promedio espacial del balance de agua, cuando se genera escorrentía. Se puede definir lo que llaman un *suelo equivalente* que reproduce los mismos valores del balance de agua. El último gráfico de la figura 5 representa el balance medio anual en los 160 observatorios, empleando el valor de  $w_o$  según el mapa y el mismo valor  $\bar{w}_o$  en todas las estaciones. Se puede observar que, en el primer caso, hay mayor variabilidad, pero que la relación media entre  $E/P$  y  $R$  es la misma en los dos casos. Este gráfico ilustra la escasa importancia de la variabilidad espacial de  $w_o$  cuando se describe el balance del agua medio anual en Andalucía. Comparando los demás gráficos se puede concluir que un valor de  $w_o$  entre 150 y 200 mm arroja un balance que se ajusta mejor a las relaciones empíricas de Budyko. La figura 6 muestra la evolución del promedio de los diferentes componentes del balance de agua, junto con su desviación típica, en función de  $w_o$ . Según Milly y Dunne (1993),  $E$  muestra una relación lineal con el logaritmo de  $w_o$ , que se ha ajustado a los datos en la figura, con una pendiente de 87. Estos mismos autores concluyen en su estudio sobre la dependencia del ciclo hidrológico mundial de  $w_o$ , que para cada duplicación de la  $w_o$  se obtiene un incremento de  $E$  en torno a 70 mm, para  $10 < w_o < 600$  mm.



**Fig. 6.** Influencia de  $w_o$  en el promedio de los componentes del balance medio anual del agua en Andalucía, calculado mediante el modelo de Milly en 160 observatorios. Los intervalos de confianza representan  $\pm$  una desviación típica y la línea discontinua representa el valor correspondiente según el Libro Blanco del Agua en España. En el gráfico para  $E$  se ha representado también el ajuste logarítmico según Milly y Dunne (1994), y en el gráfico para  $E/P$  se han reflejado los resultados correspondientes de dos métodos de cálculo.

En el caso de Andalucía hemos observado un incremento de 50 mm (tabla 5). También se ha representado el valor de  $E = 448$  mm, según el LBAE (MMA, 1998). En torno a  $w_o=170$  mm se cruza esta recta con la curva ajustada, lo que indica que aumentando  $w_o$  en un 55% obtendremos los mismos resultados y también coincidirá el balance con las curvas empíricas de Budyko (figura 5). Igualmente se puede apreciar cómo aumenta la variabilidad (intervalos de confianza son  $\pm$  s) en los datos de  $E$  cuando aumenta  $w_o$ . Se puede ver cómo disminuye  $Q$  y su variabilidad, cuando  $w_o$  aumenta, de modo que la suma de  $E$  y  $Q$  es una constante, igual a la precipitación,  $P$ , para cada  $w_o$ . El valor  $Q = 136$  mm, según el LBAE (MMA, 1998), indica en este caso un valor de  $w_o=150$  mm para Andalucía. Esta diferencia se debe a que en el LBAE se emplea un valor de  $P$ , superior al que se ha obtenido en este estudio, por lo que el valor real debería de estar entre 150 y 170 mm. De todas formas hay que recordar que los valores de  $w_o$  que se emplean en el LBAE son también estimaciones, a partir de los usos del suelo del proyecto *CORINE landcover*, donde se ha adjudicado a cada clase de uso, un valor de  $w_o$ . No se dispone de ninguna información acerca de los posibles errores o de la exactitud de estas estimaciones, lo que pone de manifiesto la escasez de *información cuantitativa* sobre los suelos a nivel regional.

El coeficiente  $E/P$  no es sensible para los diferentes valores de  $P$  empleados, por lo que su evolución con  $w_o$  también se representa en la figura 6. Al igual que  $Q$ , sus distribuciones son sesgadas, especialmente para los valores más grandes de  $w_o$ . Se han representado dos valores de  $E/P$  para cada  $w_o$ , al igual que el valor  $E/P=0.77$  obtenido en el LBAE. Los valores superiores (A) corresponden con los promedios de  $E/P$ , calculados en los 160 observatorios,

mientras que los valores inferiores (B) se calcularon como el cociente de los promedios de  $E$  y  $P$ . La intersección de la recta, que representa el valor de  $E/P$  según el LBAE, con los valores A, indica un  $w_o$  en torno a 100 mm, mientras que la intersección con los valores B muestra un  $w_o = 160$  mm. Esto significa que a *grosso modo* se puede corregir el mapa de la figura 4, multiplicando sus valores por un factor igual a 1,45. La figura 7 muestra el mapa corregido de  $w_o$ . El patrón regional que se observa se corresponde con lo que se espera intuitivamente, pero los patrones locales son menos fiables debido a la baja densidad espacial de las observaciones, su baja calidad y elevada heterogeneidad. El mapa de suelos de Andalucía tampoco aporta información a escala local. Futuras investigaciones podrían dirigirse hacia la búsqueda de variables secundarias exhaustivas provenientes de sensores remotos, como p. ej. imágenes NOAA (Odeh y McBratney, 2000), o provenientes de modelos conceptuales de la interacción suelo-paisaje (Gobin y col., 2001).

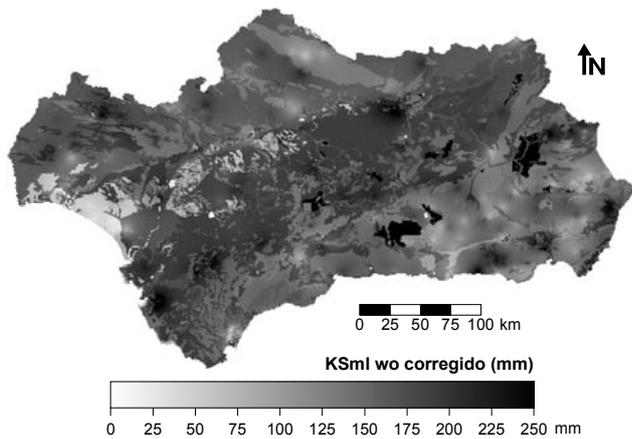


Fig. 7. Mapa de la  $w_o$ , elaborado mediante KSml en bloques de  $1 \times 1$  km, con el mapa litológico cuantificado como media local.

#### 4. Conclusiones

Mediante el uso de FET y geoestadística se ha elaborado un mapa de  $w_o$  a partir de un conjunto de datos edafológicos y el mapa de suelos de Andalucía. Los valores de  $w_o$  obtenidos para Andalucía variaban entre 0,4 y 235 mm, con una media y varianza de 110 mm y 2485 mm<sup>2</sup>, respectivamente. El mapa de suelos resulta poco eficaz para clasificar los datos de  $w_o$  en términos del CVR. Solamente para la estratificación según la litología se alcanza un valor de 0,16. La cuantificación de la leyenda de este mapa produce un mapa de  $w_o$ , con un coeficiente de correlación de 0,45 entre las observaciones y los valores del mapa. Mediante KSml y empleando este último mapa como información secundaria se obtiene un mapa final de  $w_o$ . Los valores obtenidos mediante este procedimiento han sido evaluados mediante el BAS regional, en términos de la  $Q$  y  $E$ . Comparando estos valores con las relaciones empíricas de Budyko y los resultados obtenidos en el

LBAE se llega a valores que superen la  $w_o$  calculada en un factor 1,45.

#### Referencias

- Bouma, J., 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Adv. Soil Sci.*, 9:177-213.
- Brutsaert, W., 1982. *Evaporation into the Atmosphere. Theory, History, and Applications*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht.
- Cornelis, W.M., J. Ronsyn, M. Van Meirvenne y R. Hartmann, 2001. Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65:638-648.
- C.S.I.C - I.A.R.A., 1989. *Mapa de suelos de Andalucía* (E. 1:400000), Sevilla.
- Deutsch, C.V. y A.G. Journel, 1998. *GSLIB. Geostatistical software library and user's guide*, 2ª edición. Oxford University Press, Nueva York.
- Gobin, A., P. Camping y J. Feyen, 2001. Soil-landscape modelling to quantify spatial variability of soil variables. Comunicación presentada en *Pedometrics 2001*, 4th conference of the Working Group on Pedometrics of the International Union of Soil Science, September 19-21, 2001. Ghent University, Ghent.
- Goovaerts, P., 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press, Nueva York.
- Heuvelink, G.B.M. y E. J. Pebesma, 1999. Spatial aggregation and soil process modeling. *Geoderma*, 89:47-65.
- Heuvelink, G.B.M. y R. Webster, 2001. Modelling soil variation: past, present and future. *Geoderma*, 100:269-301.
- Kutilek, M. y D.R. Nielsen, 1994. *Soil Hydrology*. Catena Verlag, Cremlingen-Destedt.
- Leenhardt, D., M. Voltz, M. Bornand y R. Webster, 1994. Evaluating soil maps for prediction of soil water properties. *European J. Soil Sci.*, 45:293-301.
- Milly, P.C.D., 1994a. Climate, interseasonal storage of soil water, and the annual water balance. *Adv. Water Resour.*, 17:19-24.
- Milly, P.C.D., 1994b. Climate, soil water storage, and the average annual water balance. *Water Resour. Res.*, 30:2143-2156.
- Milly P.C.D and K.A. Dunne, 1994. Sensitivity of the global water cycle to the water-holding capacity of soils. *J. Climate.*, 7:506-526.
- Milly P.C.D and P.S. Eagleson, 1987. Effects of spatial variability on annual average water balance. *Water Resour. Res.*, 23:2135-2143.
- MMA, 1998. *El libro blanco del agua en España*, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Monreal T.E., F. Cabezas Calvo-Rubio y F. Estrada Lorenzo, 1999. La evaluación de los recursos hídricos en el libro blanco del agua en España. *Ingeniería del Agua*, 6:125-138.
- Odeh, I.O.A. y A.B. McBratney, 2000. Using AVHRR images for spatial prediction of clay content in the lower Namoi Valley of eastern Australia. *Geoderma*, 97:237-254.
- Pannatier, Y., 1996. *VARIOWIN: Software for spatial data analysis in 2D*. Springer Verlag, Nueva York.
- Ratcliff, L.F., J.T. Ritchie y D.K. Cassel, 1983. Field-measured limits of soil water availability as related to laboratory-measured properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:770-775.
- Schaap, M.G., F.J. Leij y M. Th. van Genuchten, 1998. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62:847-855.
- Schaap, M.G., F.J. Leij y M. Th. van Genuchten, 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrol.*, 251:163-176.
- Trueba, C., R. Millán, T. Schmid, C. Roquero y M. Magister, 1999. *Base de datos de propiedades edafológicas de los suelos españoles*. Informes Técnicos CIEMAT (volúmenes 882 y 883), Madrid
- Wösten, J.H.M., A. Lilly, A. Nemes y C. Le Bas, 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*, 90:169-185.
- Wösten, J.H.M., Ya.A. Pachepsky y W.J. Rawls, 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing hydraulic characteristics. *J. Hydrol.*, 251:123-150