

## Estimación de la capacidad de retención de agua en el suelo: revisión del parámetro CRA

J. M. Domingo Santos\*, R. Fernández de Villarán San Juan, E. Corral Pazos de Provens e Í. Rapp Arrarás

*Departamento de Ciencias Agroforestales. Universidad de Huelva. Campus Universitario de La Rábida. 21819 Palos de la Frontera (Huelva)*

---

### Resumen

El parámetro de capacidad de retención de agua en el suelo (CRA) es un modelo de base física ampliamente utilizado por técnicos forestales e investigadores en ecología forestal del territorio español, como uno de los factores estimadores de las disponibilidades de agua para las plantas y, por ende, de la calidad de estación. Dentro del proyecto *Caracterización de suelos forestales de la provincia de Huelva* se han apreciado una serie de anomalías en cuanto a los valores obtenidos para el parámetro CRA, especialmente en lo referente a la influencia de la pendiente sobre el modelo para su cálculo, así como en la determinación del agua disponible para la vegetación, en relación a la reserva total. Este trabajo plantea una sencilla modificación del modelo que permite obtener valores de capacidad de retención de agua más acordes con la calidad de la estación, en los terrenos forestales de fuerte pendiente, y también extiende el modelo al cálculo de la máxima reserva de agua disponible en el suelo. La bondad de estos parámetros se contrasta mediante el análisis de correlaciones frente a un índice de calidad de estación, con resultados satisfactorios.

**Palabras clave:** suelo forestal; calidad de estación; capacidad de retención de agua; humedad equivalente.

### Abstract

#### Estimation of water retention capacity in soil: corrections to the CRA pedotransfer formula

In Spain, a physical model to estimate the soil water capacity, which is called the CRA parameter, was implemented by Gandullo (1985). This parameter is broadly used in forest management and forest ecology research in relationship with site index and soil quality variables. While running a soil mapping project in the southwest of Spain some problems related to the CRA model were detected, mainly related to the influence of slope on total soil water capacity, as well as the estimation of available water capacity. A simple correction of the model is proposed in this paper, as well as a complementary parameter for available water capacity. The quality of those new parameters is tested by means of correlation analysis against Site Index variable.

**Key words:** forest soils; site index; soil water; water capacity; available water capacity.

---

## Introducción

### El agua en el suelo

La función de absorber, retener y suministrar agua es una de las misiones ecológicas fundamentales que desempeña el suelo. En el ámbito forestal mediterrá-

neo, en el que una parte importante de la precipitación se registra en el descanso vegetativo, la cantidad de agua que la reserva del suelo es capaz de suministrar a la vegetación limita la existencia y productividad de las especies forestales, a igualdad de condiciones climáticas (González Rebollar, 1999; Montero de Burgos y González Rebollar, 1983; Gandullo *et al.*, 1998).

Por ello, a falta de mediciones de árboles para la estimación directa de la calidad de estación forestal, la información edafológica es capaz de justificar altos por-

---

\* Autor para la correspondencia: [juan.domingo@uhu.es](mailto:juan.domingo@uhu.es)  
Recibido: 01-06-05; Aceptado: 16-12-05.

centajes de variación en la productividad (Ortega y Montero, 1988), siendo las propiedades hídricas del suelo componentes fundamentales de esta información (Barnes *et al.*, 1997). Son diversos los trabajos de definición de estaciones forestales que utilizan parámetros edáficos vinculados a estas propiedades hídricas, dada la incontestable utilidad de esta información en planificación forestal y planificación física en general. Gandullo y Sánchez Palomares (1994) hicieron un compendio ampliado de un gran número de estos trabajos para caracterizar las estaciones forestales del género *Pinus*. Existen también trabajos de este tipo en frondosas, como el de Rubio *et al.* (2000) o para la caracterización de zonas de interés ecológico como el de Elena *et al.* (1997).

Por otro lado, mirando hacia el cumplimiento de condiciones de gestión sostenible, para los suelos forestales en general, según plantean Powers *et al.* (1998), las variables de estimación de la degradación edáfica que resultan más útiles en la mayoría de los casos, han sido las relacionadas con la disponibilidad de agua, por encima incluso de las relativas a la disponibilidad de nutrientes.

En consecuencia, el agua del suelo es un factor ecológico de gran importancia por lo que resulta fundamental determinar los volúmenes que el suelo puede contener, así como qué proporción de esta agua se encuentra disponible para las plantas.

Un estimador de la capacidad hídrica del suelo muy utilizado por los técnicos forestales y por los investigadores en ecología forestal españoles es el llamado parámetro de capacidad de retención de agua,

CRA, propuesto por Gandullo (1985). En el resto de esta introducción procederemos al análisis del parámetro y de algunas imprecisiones que presenta su cálculo para las cuales se proponen mejoras en el presente trabajo.

**Descripción del método de obtención del parámetro CRA (Gandullo, 1985)**

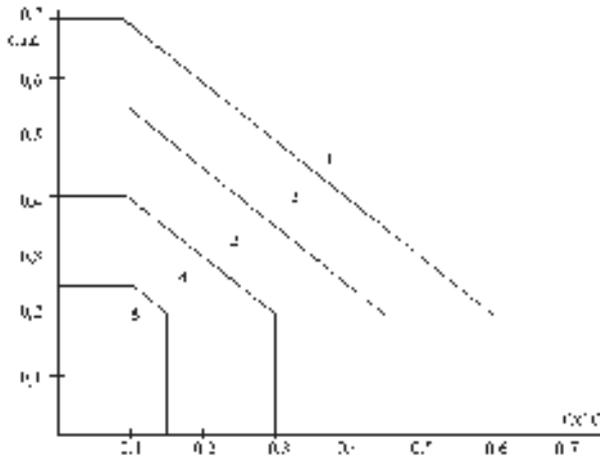
La obtención del parámetro CRA fue realizada mediante un modelo con bases físicas que estima la cantidad de agua que contendrá un suelo a su capacidad de campo en condiciones naturales, esto es, teniendo en cuenta las condiciones de drenaje, que influyen sobre el retardo en la evacuación del agua gravitacional que ocupa los macroporos del suelo.

La metodología de cálculo del parámetro se desarrolla en tres pasos:

- a) *Obtención de parámetros que condicionan la permeabilidad y condiciones de drenaje del perfil*

Gandullo (1985) define un estimador de la permeabilidad de cada horizonte edáfico, PER, en relación con el volumen de macroporos que, después de las lluvias, dejan drenar el agua y quedan llenos de aire. Se trata de un parámetro relativo adimensional, resultado de combinar otros dos parámetros, CCC y CIL cuya definición es:

<p>CCC: Coeficiente de capacidad de cementación</p> $CCC = \frac{arc - 4 \cdot mo}{TF}$ <p>CIL: Coeficiente de impermeabilidad del limo</p> $CIL = \frac{limo \cdot TF}{10^4}$	<p>Siendo:</p> <p><i>arc</i>: porcentaje de arcilla en tierra fina  <i>mo</i>: porcentaje de materia orgánica en tierra fina  <i>limo</i>: porcentaje de limo en tierra fina  <i>TF</i> el porcentaje de tierra fina sobre una muestra de tierra natural secada al aire.                  Los intervalos texturales de arcilla y limo corresponden a los definidos por el Soil Survey Staff (2003)</p>
--	--



**Figura 1.** Valores del parámetro PERmeabilidad en función de CCC y CIL (tomado de Gandullo, 1985).

Con estos dos coeficientes se entra en la Figura 1, que asigna una categoría de PER de 1 a 5 en orden creciente del grado de permeabilidad.

Se obtiene así un número natural que indica el grado de permeabilidad de cada horizonte.

b) *Cálculo del equivalente de humedad del suelo ( $h_e$ )*

El valor de  $h_e$  depende de la textura y la materia orgánica de cada horizonte siendo la expresión de su cálculo la obtenida por Sánchez Palomares y Blanco (1985):

$$h_e = 4,6 + 0,43 \text{ arc} + 0,25 \text{ limo} + 1,22 \text{ mo}$$

Donde  $h_e$  se expresa en porcentaje de peso de agua sobre peso de suelo seco que es capaz de retener una muestra preparada de tierra fina, una vez eliminada toda el agua gravitacional.

c) *Corrección de  $h_e$  a partir de los datos de drenaje y obtención del parámetro CRA*

Una vez estimado el valor del equivalente de humedad, Gandullo (1985) desarrolló un modelo físico, para estimar la parte de agua gravitacional que puede quedar disponible en el suelo a causa de la mayor lentitud de drenaje de horizontes inferiores, proponiendo la estimación de CRA de cada horizonte mediante la siguiente expresión:

$$CRA(mm/m) = \left[ 12,5 \cdot h_e + 12,5 \cdot (50 - h_e) \cdot \frac{k}{2} \right] \cdot c \cdot \frac{TF}{100}$$

Donde:

$h_e$  = equivalente de humedad de la tierra fina de ese horizonte.

$c$  = complemento a uno de la pendiente en que se encuentra dicho suelo, expresada esta pendiente en tanto por uno.

$TF$  = porcentaje de tierra fina secada al aire de ese horizonte, con respecto a tierra natural.

$k$  = coeficiente que depende del valor de PER de ese horizonte ( $p_s$ ), del valor de PER del horizonte inmediato inferior ( $p_i$ ) y de la pendiente del terreno.

El coeficiente  $k$  vale 0 cuando en el horizonte inferior el valor de PER es igual o mayor que en el superior y, en caso contrario, varía entre 0 y 1 tomando los valores que se obtienen de la expresión:

PER	a
1	0
2	0,2
3	0,4
4	0,6
5	0,8

donde  $a$  se obtiene por la correspondencia  
 $k = 1 - a_i - (1 + a_s) (1 - c)$  →

Siendo:

$a_i$  = valor de  $a$  para el horizonte inferior al que se estudia.

$a_s$  = valor de  $a$  para el horizonte cuya  $k$  se calcula.

Con el valor de CRA de cada horizonte, obtenido en altura de agua por cada metro de espesor de horizonte (mm/m), se calcula el valor de la capacidad de retención de agua para todo el suelo, sin más que sumar los productos de las CRA de cada horizonte por sus espesores respectivos medidos en metros.

**Aspectos del parámetro CRA que precisan revisión**

En el curso de diversos trabajos de investigación (Domingo Santos, 2002), se ha observado que, en un cierto número de casos, los valores calculados para la CRA del suelo no se correspondían sobre el terreno con el estado general del ecosistema, obteniéndose correlaciones muy débiles entre variables tan relacionadas, a priori, como la CRA y la productividad forestal.

De igual forma, consultados otros trabajos científicos que utilizan el parámetro en la delimitación de estaciones ecológicas de pinares (Gandullo y Sánchez Palomares, 1994) se apreció que CRA no presentaba en general capacidad discriminante de la calidad de estación, cuando sí la presentan otros parámetros relacionados, como el contenido en tierra fina o el porcentaje de limo.

Por otro lado, en el levantamiento de datos edafológicos para la «Caracterización de suelos forestales de la provincia de Huelva» (Domingo Santos, 2002) se apreció que, para valores de CRA similares (en los rangos bajos) los suelos sobre pendientes fuertes presentaban un mejor estado de la vegetación que los que se encontraban en zonas de poca inclinación.

Llevando la fórmula de cálculo de la CRA a valores extremos de pendiente se tiene que, para inclinaciones del terreno iguales o mayores a 45° (100% de pendiente), el valor del parámetro CRA es cero, lo que haría prácticamente imposible la existencia de vegetación arbórea en un clima mediterráneo. Existe una gran cantidad de ejemplos de masas forestales sobre pendientes abruptas como se muestra en la Figura 2.

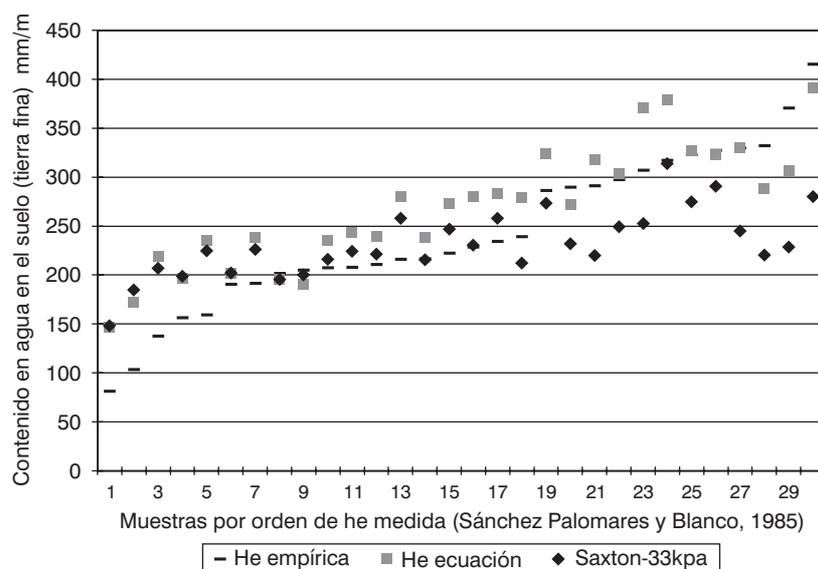
Se considera por lo tanto conveniente la revisión del cálculo de la CRA, dado el interés y elevada utilización de este parámetro en la investigación forestal española.

Una de las grandes ventajas de este modelo es que, salvo el cálculo del equivalente de humedad ( $h_e$ ), se tra-



**Figura 2.** Ladera de pinar en Almonaster La Real (Huelva) que presenta pendientes superiores al 100% en la mayor parte de su recorrido. La ladera acoge un pinar (*P. pinea* L.) en buen estado, lo que debe ir asociado a una cierta reserva hídrica en el suelo.

ta de una expresión deducida con una base física, no un modelo de coeficientes estadísticos tipo «caja negra», lo que facilita su interpretación y revisión. En lo que concierne a  $h_e$  se trata de una expresión similar a las obtenidas por otros autores (Figura 3), que estima la humedad total contenida por los materiales finos de un suelo en su capacidad de campo.



**Figura 3.** Comparación de los valores de  $h_e$  medidos por Sánchez Palomares y Blanco (1985) con los estimados por la ecuación obtenida por los mismos autores y con la estimación del contenido en agua a un potencial de 33 kPa según Saxton *et al.* (1986). Los valores texturales usados son los 30 primeros de los 94 registros utilizados por los investigadores españoles en su análisis de regresión. Se puede apreciar que hasta valores de 250 mm/m se obtienen errores parecidos de ambos modelos respecto del valor empírico.

## Material y Métodos

El método de trabajo se ha estructurado en dos partes: en la primera se justifica y discute el método de cálculo de CRA como modelo físico, proponiendo algunas modificaciones cuya bondad se contrasta en la segunda parte mediante análisis de correlación.

### Análisis y propuesta de modificación del parámetro CRA

Se parte de la expresión original:

$$CRA(mm/m) = \left[ 12,5 \cdot h_e + 12,5 \cdot (50 - h_e) \cdot \frac{k}{2} \right] \cdot c \cdot \frac{TF}{100}$$

Si se desarrolla el paréntesis, en la expresión se diferencian claramente dos términos:

$$\text{Primer término} \rightarrow [12,5 \cdot h_e] \cdot c \cdot \frac{TF}{100}$$

Este primer término expresa la capacidad de campo de la tierra natural con drenaje libre, siendo:

$12,5$  → factor de conversión de las unidades de la  $h_e$ , expresada en porcentaje de peso, a volumen en altura de agua por unidad de espesor de suelo (mm/m), tomando  $1,25 \text{ g/cm}^3$  como densidad media aparente del suelo.

$TF/100$  → minoración de la capacidad de retención de agua debido al volumen ocupado por fragmentos gruesos del suelo natural, puesto que la determinación de  $h_e$  se realiza sobre volumen de tierra fina.

$c$  → complemento a uno de la pendiente ( $1 - \tan \alpha$ ), siendo  $\alpha$  el ángulo de pendiente; este coeficiente trataría de evaluar la parte de agua que no llega al perfil al perderse por escorrentía superficial.

Con respecto al último coeficiente corrector  $c$ , se debe decir que, desde el punto de vista de la confección de un balance hídrico, sí puede resultar adecuado minorar la precipitación total, ya que una parte de ésta puede no penetrar en el suelo cuando exista pendiente o hacerlo en otro punto distante; así, según Frevert (en Porta *et al.*, 1994) la escorrentía puede aumentar hasta un 28% en terrenos de pendientes fuertes con respecto a los te-

renos casi llanos. Sin embargo, desde el punto de vista de la cantidad de agua total que el suelo es capaz de albergar con drenaje libre, parece lógico pensar que la pendiente no deba ser un factor condicionante, pues la matriz edáfica se comporta como una esponja parcialmente escurrida, que mantiene el agua sea cual sea la posición en que se coloque.

En resumen, quizás se necesite una mayor cantidad de agua de lluvia para llenar la reserva del suelo en condiciones de pendiente, pero la capacidad de esta reserva no tiene por qué verse modificada.

$$\text{Segundo término} \rightarrow 12,5 \cdot (50 - h_e) \cdot \frac{k}{2} \cdot c \cdot \frac{TF}{100}$$

Este segundo término estima la cantidad de agua que, ocupando poros grandes del suelo, no es drenada en un plazo corto de tiempo, por lo que resulta de muy fácil acceso por las plantas, al estar retenida con potenciales pequeños (en valor absoluto). Esto es debido principalmente a la diferente permeabilidad de los horizontes edáficos, de tal forma que si un horizonte profundo es menos permeable que el que se encuentra por encima, la evacuación del agua en el horizonte superior será más lenta que si existiera un drenaje libre.

$12,5$  → Este coeficiente tiene idéntico significado de cambio de unidades que en el primer término.

$(50 - h_e)$  → esta expresión hace una aproximación al volumen de poros grandes existente en el suelo; las densidades aparentes de los suelos ( $d_{ap}$ ), pueden relacionarse con la densidad de las partículas sólidas ( $d_r$ ), mediante la expresión:

$$d_{ap} = (1 - p) d_r$$

Donde  $p$  es la porosidad de suelo en tanto por uno. Los valores de  $p$  varían en los suelos estudiados entre 0,36 y 0,52 (Domingo Santos, 2002), con una media cercana a 0,43; otros autores (Porta *et al.*, 1994; Birkenland, 1999) indican rangos medios de  $d_{ap}$  entre 1,35 y  $1,6 \text{ g cm}^{-3}$  lo que, para una  $d_r$  media de  $2,65 \text{ g cm}^{-3}$ , significa porosidades entre 0,49 y 0,39. Gandullo (1985) considera una  $d_{ap}$  de  $1,25 \text{ g cm}^{-3}$  que equivale a porosidad 0,53. Este aumento es normal cuando las mediciones densimétricas se hacen sobre muestra alterada (esponjada).

Por lo tanto, es razonable aceptar que el volumen total de poros pueda redondearse al 50% del volumen del

suelo y, como  $h_e$  es un estimador del volumen de poros pequeños ( $50 - h_e$ ) estimará el resto de huecos del suelo, que están disponibles para ser llenados por aire o por agua gravitacional.

$k \rightarrow$  es un coeficiente estimador de la cantidad de agua que puede permanecer en el perfil durante un tiempo razonable, a causa de la lenta permeabilidad de otros horizontes inferiores, calculándose según el proceso visto en la introducción.

$c \rightarrow$  tiene el mismo significado que en el primer término de la fórmula y, en este caso, actúa como coeficiente de minoración de  $k$ , siendo lógico que, si existe pendiente, una parte importante del agua se evacúe en forma de flujo subsuperficial.

$TF/100 \rightarrow$  minoración debida al volumen ocupado por fragmentos gruesos del suelo natural.

Por último, se observa que todo el término se encuentra dividido por 2, lo que se interpreta como una promediación del agua gravitacional disponible, entre el momento inicial del aporte y el momento en el que esta agua termine por desaparecer del perfil.

#### Resumen de principales problemas de la fórmula de la CRA

Una vez analizada la fórmula, se pueden hacer los siguientes comentarios:

— La estimación se hace sobre el equivalente de humedad total, sin tener en cuenta que una parte del agua del suelo no es utilizable por los organismos vegetales.

— La corrección de la pendiente, aplicada al primer término de la fórmula, minora en exceso la CRA de los suelos sobre pendientes fuertes.

#### Modificaciones de la fórmula

Se plantean las siguientes modificaciones:

— Calcular el primer término de la fórmula sin minorarlo con el factor  $c$  de complemento a uno de la pendiente.

— Desarrollar un parámetro complementario de capacidad de retención de agua disponible para la vegetación (CRAD).

En consecuencia, para la estimación de la capacidad hídrica total, que se denominará parámetro CRA modificado (CRAM), después de la eliminación del

coeficiente  $c$  del primer término de la ecuación, ésta quedará así:

$$CRAM(mm/m) = \left[ 12,5 \cdot h_e + 12,5 \cdot (50 - h_e) \cdot c \cdot \frac{k}{2} \right] \cdot \frac{TF}{100}$$

Se define el parámetro «CRA disponible» (CRAD) introduciendo en el primer sumando de la expresión anterior un coeficiente  $d$  minorador de  $h_e$ , obtenido como ratio de agua disponible sobre agua total almacenable:

$$CRAD(mm/m) = \left[ 12,5 \cdot h_e \cdot d + 12,5 \cdot (50 - h_e) \cdot c \cdot \frac{k}{2} \right] \cdot \frac{TF}{100}$$

Siendo  $d$  el cociente:

$$d = \frac{\theta_{33} - \theta_{1500}}{\theta_{33}}$$

Donde:  $\theta_{33}$ : contenido en agua para un potencial hídrico  $\Psi = 33$  kPa (suelo en capacidad de campo)  
 $\theta_{1500}$ : contenido en agua para un potencial hídrico  $\Psi = 1500$  kPa (suelo en punto de marchitamiento permanente)

La expresión que plantean Saxton *et al.* (1986) para el cálculo de los valores  $\theta$  es:

$$\theta_{\Psi} = \left( \frac{\Psi}{A} \right)^{1/B}$$

Siendo:

$$A = 100 \cdot e^{-4,396 - 0,0715 \cdot arc - 4,880 \cdot 10^{-4} \cdot Arc^2 - 4,285 \cdot 10^{-5} \cdot Arc^2 \cdot arc}$$

$$B = -3,140 - 2,22 \cdot 10^{-3} \cdot arc^2 - 3,484 \cdot 10^{-5} \cdot Arc^2 \cdot arc$$

Donde *arc* y *Arc*: porcentajes de arcilla y arena en tierra fina respectivamente

Estas expresiones son indicadas como válidas por los autores para valores de  $\Psi$  entre 10 y 1500 kPa.

Debe señalarse que aunque el valor de  $\theta_{33}$  podría haberse utilizado como un estimador alternativo de  $h_e$ , esto se ha evitado expresamente, con el fin de mantener los parámetros CRAM y CRAD lo más comparables posible con el CRA.

## Contraste de los parámetros CRAM y CRAD

Para evaluar la validez de los parámetros propuestos se ha observado su correlación lineal frente a un estimador directo de la calidad de estación, como es el «Índice de sitio» (Site Index, SI), puesto que las variables de calidad edafológica pueden explicar un elevado porcentaje de la variación de la producción forestal (Ortega y Montero, 1988).

Para la realización del contraste se ha partido de los datos recogidos en la caracterización ecológica de *Pinus nigra* Arn. (Elena Roselló y Sánchez Palomares, 1991), que utilizan la altura de Assmann a los 50 años como Índice de sitio, así como la información climática y fisiográfica (Elena Roselló *et al.*, 1985) y la edafológica (Sánchez Palomares *et al.*, 1990) de este mismo pino. Con la información de las 122 parcelas levantadas por los autores citados se ha procedido al cálculo de los parámetros CRAM y CRAD de cada horizonte y de los perfiles completos.

Además de los parámetros CRAM, CRAD y CRA se han introducido en el análisis otros parámetros edafoclimáticos de interés, definidos por los autores anteriormente citados, dado que presentan correlaciones significativas con SI en los resultados que ofrecen.

Se ha analizado tanto la masa total de datos como subconjuntos diversos, con el fin de reducir la variabilidad debida a otros factores ecológicos. Estos subconjuntos han sido: las parcelas correspondientes a las formas *pirenaica* e *hispanica* de *Pinus nigra* por separado; parcelas que no albergaban litologías dolomíticas, dado el carácter especial de esta roca; parcelas en las que la CRAD es inferior a 150 mm, a la búsqueda de condiciones más limitantes de agua que generarían respuestas mayores a los incrementos de CRAM y CRAD; parcelas de *P. nigra* *F. hispanica* con CRAD inferior a 150 mm.

El análisis de correlaciones de Pearson se ha llevado a cabo mediante el *software* SPSS v 10.1.

## Resultados

Los valores calculados de los parámetros CRAM y CRAD para las 122 parcelas se indican en la Tabla 1, junto con la CRA obtenida por Sánchez Palomares *et al.* (1990) sobre los mismos datos de trabajo y la calidad de estación, SI, medida por Elena Roselló y Sánchez Palomares (1991) para las mismas parcelas.

Las correlaciones obtenidas para distintas selecciones de muestras se exponen en la Tabla 2. Además de los parámetros de estudio, se han incluido en el análisis dos parámetros utilizados por Gandullo y Sánchez Palomares (1994) en la caracterización de estaciones de *Pinus nigra* por su importante correlación con la calidad de estación en el caso de la forma *hispanica*. Estos parámetros, calculados a partir de las mismas fuentes citadas, son:

— |LIM-25|: valor absoluto del porcentaje de limo en tierra fina menos 25

— |IH-60|: valor absoluto del índice hídrico anual de Thornthwaite menos 60

Para la forma *pirenaica* los mismos autores no señalan parámetros altamente significativos.

Como se aprecia en la Tabla 2 los dos parámetros propuestos presentan correlaciones muy significativas, tanto en el total de la muestra, como en la mayor parte de los subconjuntos definidos. Únicamente la forma *hispanica* presenta una correlación con un nivel de significación inferior, entre 0,05 y 0,01 para CRAM, pero puede apreciarse que es un nivel similar al del parámetro |LIM-25|, resultando algo más favorable para el parámetro CRAM. En este caso, |IH-60| supera a los parámetros edafológicos, dejando ver la importancia de este parámetro climático para esta situación particular.

Para la variedad *pirenaica* se obtienen índices de correlación muy significativos para CRAD y significativos para CRAM, lo que se considera muy interesante, dada la ausencia de variables de estos niveles de significación en los cálculos realizados por Gandullo y Sánchez Palomares (1994).

Para el conjunto total de la población muestral, los dos parámetros propuestos son muy significativos, superando a CRA que también aparece como significativo.

## Discusión

Entre las diversas fórmulas existentes para la estimación de la capacidad hídrica de un suelo, el parámetro CRA plantea un modelo que no se limita a estudiar el agua retenida por una muestra alterada de tierra fina, sino que tiene en cuenta la posible retención de agua por la existencia de horizontes profundos menos permeables.

**Tabla 1.** Valores calculados de CRAM y CRAD, junto con los valores de CRA y SI dados por Sánchez Palomares *et al.* (1990) y por Elena Rosselló y Sánchez Palomares (1991) respectivamente en 122 parcelas de *Pinus nigra* del territorio español

PARCELA	SI	CRA	CRAM	CRAD	PARCELA	SI	CRA	CRAM	CRAD	PARCELA	SI	CRA	CRAM	CRAD	PARCELA	SI	CRA	CRAM	CRAD
001	12	158	241	127	031	11	35	79	47	061	13	50	48	23	091	13	324	377	120
002	8,2	105	114	59	032	10	64	158	102	062	10	133	161	91	092	11	44	77	44
003	9,9	49	114	67	033	9,2	32	69	42	063	11	195	231	118	093	11	149	210	114
004	9,7	20	154	58	034	9,1	143	211	101	064	10	148	161	56	094	12	77	76	50
005	21	62	214	131	035	11	48	77	36	065	18	397	396	162	095	12	53	140	68
006	14	71	193	102	036	7,7	106	158	73	066	12	304	257	121	096	15	51	111	61
007	12	63	144	73	037	13	92	170	88	067	14	347	301	141	097	10	103	179	89
008	9,2	59	110	60	038	14	119	130	50	068	12	28	28	11	098	13	47	173	79
009	15	84	182	103	039	7,4	108	142	56	069	10	249	289	171	099	11	80	146	88
010	12	217	328	175	040	6,5	117	118	43	070	12	250	271	168	100	10	236	259	107
011	17	97	172	94	041	11	120	136	58	071	13	288	353	210	101	9,2	81	135	78
012	14	226	263	145	042	6,8	138	170	86	072	13	83	129	36	102	14	156	165	83
013	8,6	86	163	95	043	12	48	110	58	073	11	42	41	22	103	17	197	271	149
014	9,8	82	201	111	044	9,9	99	152	82	074	13	66	115	44	104	15	148	308	147
015	13	182	321	181	045	17	68	121	66	075	16	153	286	132	105	10	222	382	191
016	12	157	342	208	046	9	39	71	37	076	11	93	190	95	106	9,6	41	90	52
017	11	230	377	239	047	9	82	110	42	077	13	73	81	37	107	15	181	283	70
018	13	258	360	219	048	7,3	75	165	92	078	11	316	313	141	108	14	120	288	92
019	12	174	259	144	049	6,8	265	390	196	079	15	38	76	41	109	16	128	233	105
020	14	397	397	219	050	15	67	136	72	080	12	66	87	57	110	12	144	200	89
021	7	83	172	104	051	9,3	137	153	88	081	11	357	336	171	111	15	51	95	55
022	16	71	347	209	052	15	81	124	47	082	13	192	359	168	112	19	81	306	132
023	12	147	297	183	053	9,8	50	81	35	083	14	74	119	57	113	13	67	102	49
024	14	161	239	139	054	9,6	47	132	65	084	10	43	43	23	114	13	78	225	130
025	13	158	225	136	055	12	90	125	65	085	11	37	126	60	115	15	75	94	58
026	17	383	404	237	056	10	27	43	29	086	15	408	405	132	116	13	148	365	180
027	19	231	297	170	057	11	476	476	236	087	9,4	28	88	43	117	13	147	264	97
028	8,8	26	54	31	058	13	132	163	104	088	12	104	183	83	118	10	155	219	104
029	12	97	177	91	059	9,9	130	131	74	089	10	79	162	92	119	9,1	147	283	112
030	13	60	115	69	060	14	93	103	40	090	11	58	101	58	120	9,9	188	165	84
															121	10	89	108	52
															122	10	107	181	72

Estas cualidades tienden un puente hacia otros modelos experimentales centrados en la acción del agua en superficie, como son los modelos de erosión o de escorrentía, para los que se considera que puede llegar a ser un interesante complemento.

Al interés enunciado del parámetro CRA para la investigación futura se une su alto grado de incorporación a la gestión forestal y la investigación en ecología forestal.

Mantener vivo un modelo implica su revisión periódica, cuando la adquisición de información o el avance de la ciencia así lo aconsejen, y en este trabajo se da un

primer paso, cuando se van a cumplir los veinte años de su publicación.

En esta revisión se ha propuesto la eliminación del coeficiente de minoración de la capacidad de retención de agua por causa de la pendiente, para el agua retenida por el suelo con un potencial superior (en valor absoluto) al gravitatorio. Esta modificación evita la asignación directa de capacidad cero a suelos sobre pendientes superiores al 100% y es coherente con la presencia de vegetación bien desarrollada en suelos sobre pendientes muy fuertes.

**Tabla 2.** Análisis de correlaciones entre la calidad de estación (SI) de *Pinus nigra* y otras variables entre las que se encuentran los parámetros CRAM y CRAD que se proponen en el presente trabajo.

Selección de casos ==>		CORRELACIONES CON SI					
		Todas	F. pirenaica	F. hispanica	No Dolomía	CRAD < 150	F. hisp. + crad < 150
N.º de casos ==>		122	54	68	92	102	59
Variables							
CRA	Corr.Pearson	0,1798*	0,2199	0,1421	0,1699	0,1329	0,1423
	Sig.(bilateral)	0,0475	0,1101	0,2478	0,1054	0,1829	0,2823
CRAM	Corr.Pearson	0,2885**	0,3290*	0,2708*	0,3133**	0,3070**	0,3352**
	Sig.(bilateral)	0,0013	0,0151	0,0255	0,0024	0,0017	0,0094
CRAD	Corr.Pearson	0,2584**	0,3566**	0,1738	0,2813**	0,2845**	0,2704*
	Sig.(bilateral)	0,0041	0,0081	0,1563	0,0066	0,0038	0,0383
LIM-25	Corr.Pearson	-0,0991	0,1361	-0,2627*	-0,0183	-0,1605	-0,2526
	Sig.(bilateral)	0,2773	0,3264	0,0304	0,8628	0,1071	0,0536
IH-60	Corr.Pearson	-0,1922*	0,0786	-0,3669**	-0,1488	-0,2826**	-0,4174**
	Sig.(bilateral)	0,0339	0,5723	0,0021	0,1569	0,0040	0,0010

\* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral) → Significativa.

\*\* La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral) → Muy significativa.

Para complementar el parámetro modificado (CRAM) se plantea otro que estime la capacidad de agua disponible (CRAD) en el suelo. Para ello se utilizan métodos de estimación del contenido de agua en el punto de marchitamiento (1500 kPa) desarrollados por otros autores, que permiten determinar un coeficiente que indique la proporción entre agua total y agua disponible.

Los parámetros CRAM y CRAD se han contrastado frente a las condiciones de calidad de estación forestal para el caso particular de *Pinus nigra* y los resultados obtenidos ponen de manifiesto una mejor capacidad indicadora de las condiciones de sitio, frente al parámetro CRA sin modificar.

No se ha detectado una superioridad clara de CRAD sobre CRAM como estimador de la calidad de estación por lo que se considera interesante utilizar ambos, puesto que los dos son muy significativos en la mayor parte de los subconjuntos poblacionales formados.

Por lo tanto, se considera que la sencilla modificación propuesta del parámetro CRA va a mejorarlo como estimador del contenido potencial de agua en el suelo, muy vinculado a la calidad y condiciones límites de estación. Por ello, sería de gran interés proceder a una revisión de los estudios paramétricos para la caracterización de estaciones de las distintas especies forestales españolas.

Es plausible que las fórmulas de aproximación estadística propuestas por los autores originales para el cálculo de  $h_e$  pueden ser revisadas para obtener una mayor precisión que las adapte a particularidades locales, sin embargo, como dicen Saxton *et al.* (1986): «A menudo, el investigador del suelo está dispuesto a sacrificar una parte de la precisión de estas mediciones a cambio de una mayor eficacia, especialmente cuando lo que se buscan no son valores exactos, sino órdenes de magnitud».

## Agradecimientos

El Grupo empresarial ENCE, financiador del proyecto «Caracterización de suelos forestales de la provincia de Huelva», ha hecho posible esta investigación y dentro de éste se quiere agradecer especialmente a Gabriel Toval y Federico Ruiz su colaboración y la confianza depositada en el equipo de investigación del suelo de la UHU.

El profesor Otilio Sánchez Palomares dirigió el trabajo de tesis doctoral en el que se fraguó este estudio y nos ha dado apoyo entusiasta para plantearlo a la comunidad científica. El profesor José Manuel Gandullo, que tantas cosas nos ha enseñado, desarrolló una ingenue y excelente labor investigadora a la que quisiéramos dedicar esta pequeña aportación.

## Referencias bibliográficas

- BARNES B.V., ZAK D.R., DENTON S.R., SPURR S.H., 1997. Forest Ecology 4<sup>th</sup> Edition. Ed. John Wiley & Sons, Inc. New York. 774 pp.
- BIRKELAND P.W., 1999. Soils and Geomorphology. Oxford University Press, 430 pp.
- DOMINGO SANTOS J.M., 2002. Caracterización de suelos forestales de la provincia de Huelva. Tesis Doctoral. E.T.S.I. Montes. Universidad Politécnica de Madrid. 395 pp. + anejos.
- ELENA R., GÓMEZ V., SAN MIGUEL A., SÁNCHEZ PALOMARES O., SÁNCHEZ F., SERRADA R., ZAZO J., 1997. Estudio edafológico del Parque Nacional de la Montaña de Covadonga (Asturias/León). Actas II Congreso Forestal Español, Irati-97. Pamplona 23 al 27 de junio. S.E.C.F. Gobierno de Navarra. Tomo II, 289-294.
- ELENA R., SÁNCHEZ PALOMARES O., 1991. Los pinares españoles de *Pinus nigra* Arn.: Síntesis ecológica. Colección Monografías INIA, n.º 81. MAPA-INIA. Madrid. 110 pp.
- ELENA R., SÁNCHEZ PALOMARES O., CARRETERO M.P., 1985. Estudio fisiográfico y climático de los pinares autóctonos españoles de *Pinus nigra* Arn. Comunicaciones INIA, Serie Recursos Naturales n.º 36. MAPA-INIA. Madrid. 128 pp.
- GANDULLO J.M., 1985. Ecología Vegetal. Fundación Conde del Valle de Salazar. Madrid. 208 pp.
- GANDULLO J.M., SÁNCHEZ PALOMARES O., 1994. Estaciones ecológicas de los pinares españoles. ICONA-MAPA. Madrid. 188 pp.
- GANDULLO J.M., SÁNCHEZ-PALOMARES O., MUÑOZ L.A., 1998. Una nueva clasificación climática para España. Ecología. n.º 12, 66-77.
- GONZÁLEZ REBOLLAR J.L., 1999. Suelo, relieve, agua y paisaje. Invest. Agr.: Sist. Recur. Forestales. Fuera de serie n.º 1. Diciembre 1999.
- MONTERO DE BURGOS J.L., GONZÁLEZ REBOLLAR J.L., 1983. Diagramas bioclimáticos. ICONA. Madrid. 379 pp.
- ORTEGA A., MONTERO G., 1988. Evaluación de la calidad de las estaciones forestales. Revisión bibliográfica. Ecología. N.º 2, 155-184.
- PORTA J., LÓPEZ-ACEVEDO M., ROQUERO C., 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Mundi-Prensa. Madrid. 807 pp.
- POWERS R.F., TIARKS A.E., BOYLE J.R., 1998. Assessing Soil Quality: Practicable Standards for Sustainable Forest Productivity in the United States. En: The Contribution of Soil Science to the Development of and Implementation of Criteria and Indicators of Sustainable Forest Management. SSSA Special Publication n.º 53. cap. 3, pp. 53-80.
- RUBIO A., SÁNCHEZ PALOMARES O., BLANCO A., GÓMEZ V., GRAÑA D., ELENA R., 2000. Los hayedos de Aragón: notas para una caracterización paramétrica. Montes. 62, 49-55
- SÁNCHEZ PALOMARES O., BLANCO A., 1985. Un modelo de estimación del equivalente de humedad de los suelos. Montes. 4, 26-30.
- SÁNCHEZ PALOMARES O., ELENA R., CARRETERO M.P., 1990. Caracterización edáfica de los pinares autóctonos españoles de *Pinus nigra* Arn. Comunicaciones INIA, Serie Recursos Naturales n.º 55. MAPA-INIA. Madrid. 95 pp.
- SAXTON K.E., RAWLS W.J., ROMBERGER J.S., PAPENDICK R.I., 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. Soil Sc. Soc. of Am. Journal. Vol. 50, 1031-1036.
- SOIL SURVEY STAFF, 2003. Keys to Soil Taxonomy. United States Department of Agriculture & Natural Resources Conservation Service, 9th Edition. 332 pp.