



**CONTROL GEOMORFOLÓGICO DE LA SALINIDAD EN SUELOS  
ALUVIALES. SECTOR CENTRAL DEL VALLE DEL TAJO.  
MADRID-TOLEDO**

*Geomorphological control of salinity in alluvial soils.  
Tajo central valley, Madrid-Toledo*

E. Roquero<sup>(1)</sup>, J.L. Goy<sup>(2)</sup>, C. Zazo<sup>(3)</sup> y O. Artieda<sup>(4)</sup>

*(1) Dpto. de Edafología. E.T.S.I. Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid 28040 Madrid.  
eroq@eda.etsia.upm.es*

*(2) Dpto. de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Salamanca. 37008 Salamanca*

*(3) Dpto. de Geología. Museo Nacional de Ciencias Naturales. José Abascal 2. 28006 Madrid*

*(4) Servicio de Investigación Agroalimentaria. D.G.A. Apdo. 727. 50080 Zaragoza.*

**Resumen:** Se estudian los suelos desarrollados en la llanura de inundación del río Tajo, en un sector comprendido entre las ciudades de Aranjuez y Toledo, y de la llanura aluvial de un tributario de segundo orden del río Tajo, el arroyo Melgar. En general los suelos corresponden a Xerofluents Típicos, excepto en posiciones locales frecuentemente asociadas a antiguos canales y meandros abandonados donde existen procesos de hidromorfía apareciendo Xerofluents Acuicos. En estas unidades y posiciones morfológicas la tendencia a la hidromorfía es sustituida en ocasiones, por una marcada salinidad, apareciendo Aquisalids Típicos o Haplosalids Típicos. La susceptibilidad a la salinidad en este sector de la llanura es resultado de la particularidad del contexto geomorfológico, del clima árido, y de las oscilaciones del nivel freático cercano a la superficie, (150-190 cm). La evaporación superior a la recarga, provoca un movimiento ascendente por capilaridad, favorecido por las finas texturas de los suelos. Los horizontes donde se acumulan las sales o el yeso, se desarrollan en la zona intermedia de los movimientos ascendentes y descendentes del agua. Los resultados obtenidos reflejan las posibilidades de la aplicación de la cartografía geomorfológica al diagnóstico de la salinidad puesto que ésta es una consecuencia directa de la combinación de la morfología, los depósitos y el drenaje, que son los aspectos controlados por el factor geomorfológico.

**Palabras clave:** llanura de inundación, Tajo, nivel freático, suelos salinos, suelos yesíferos, clima árido

**Abstract:** Soils developed on the Tajo floodplain and on the alluvial plain of one of its main tributaries (Arroyo Melgar) have been studied between Aranjuez and Toledo (Central Spain). Generally soils are Typic xerofluents but in local positions associated to abandoned channels or meanders, where hydromorphy processes take place, soils are Aquic xerofluents. However in some cases, and under the same morphological conditions, a marked salinity occurs, dominating then Aquollic salorthids. High susceptibility to salinity in these environments results from three causes: the particularity of the geomorphological framework, the semiarid climate and the oscillations of the water table close to the surface (maximum depth 150-190 cm). The evaporation higher than the water recharge produces an upwards capillary movement favored by the fine textures of these soils. The horizons where salts and gypsum accumulates are developed in the intermediate zone of upwards-downwards soil solution movement. The results obtained show the possibilities of the application of geomorphological cartography in the diagnosis of the salinity, because this is a direct consequence of the combination of morphology, deposits, and drainage. The origin of this salinity is the result of the combination of local positions of soils profiles in deficient drainage units, the saline and gypsiferous Miocene substratum and the semiarid climate.

**Key words:** floodplain, Tajo, water table oscillations, saline soils, gypsiferous soils, arid climate.



Roquero, E., Goy, J. L., Zazo, C. y Artieda, O. (2001). Control geomorfológico de la salinidad en suelos aluviales. Sector central del valle del Tajo. Madrid-Toledo. *Rev. C. & G.*, 15 (3-4), 95-107. © SEG. AEQUA. GEOFORMAEdiciones

## 1. Introducción

La abundancia en España de litologías ricas en yeso y otras sales más solubles (materiales triásicos, paleógenos, neógenos) junto con la relativa aridez de muchas de sus comarcas determina la existencia de interesantes relaciones entre la geomorfología y los suelos salinos. En el sector central de la Cuenca del Tajo, la presencia de suelos yesíferos, con horizontes gípsicos diagnóstico, está asociada tanto a la evolución de los materiales originales yesíferos aflorantes (Roquero *et al.*, 1996), como a las formaciones superficiales cuaternarias asociadas a los glacis erosivos desarrollados en yesos. Los suelos salinos tienen un carácter más puntual y dependen no sólo de la presencia de sales en el material original sino también de las unidades geomorfológicas, y las condiciones de drenaje interno y externo subsecuentes. En este sentido suelen aparecer en unidades que presentan un cierto endorreísmo como los fondos semiendorreicos, donde estos procesos son habituales debido a las dificultades de drenaje características de estas unidades y el afloramiento de materiales yesíferos y salinos de la propia cuenca. Sin embargo, la presencia de suelos yesíferos y salinos asociados a los fondos de valle aluvial y la propia llanura de inundación del río Tajo, tiene un carácter local en el que intervienen varios factores que se analizan en este trabajo. En este contexto, la existencia de perfiles de suelos con horizontes genéticos muy diferenciados incluso en formaciones holocenas, representa una aparente contradicción entre el grado de evolución de los perfiles y la edad reciente de las formaciones. Características similares han sido descritas en otros valles fluviales de menor rango (Porta 1977, Pérez Arias *et al.*, 1984, Laya, 1989).

En la llanura de inundación del río Tajo, los suelos afectados por procesos de hidromorfia se asocian a los elementos geomorfológicos que presentan un drenaje deficiente, siendo menos fre-

cuenta la salinidad. En este trabajo realizamos el estudio comparativo de los suelos desarrollados sobre diferentes elementos geomorfológicos de un sector de la llanura de inundación del río Tajo, y de los suelos desarrollados en la llanura aluvial del arroyo Melgar, afluente del primero con el fin de determinar las causas genéticas de la salinidad.

Las llanuras de inundación de los ríos, desde el punto de vista sedimentológico no son unidades homogéneas y, especialmente en los sistemas meandriiformes, los procesos de ocupación del río en momentos de avenidas y los procesos de migración de los meandros generan un complejo microrelieve, constituido por formas y depósitos de fuertes contrastes granulométricos. Los trabajos que relacionan las formas con modelos y características texturales de los suelos (Holmes y Western, 1969; Bridges, 1987) asocian los procesos de hidromorfia a los suelos desarrollados sobre depósitos formados por texturas más finas. En climas áridos, con nivel freático alto, si existe una fuente de sales, se producen procesos de salinización, aunque según Vallaray (1987) la salinidad en suelos aluviales afecta generalmente a grandes áreas en cuencas donde aflora una litología adecuada como fuente de sales, y generalmente asociada a climas áridos y en condiciones de drenaje limitado.

## 2. Material y métodos

Se realizó una cartografía geomorfológica de detalle (escala 1: 20.000) de este sector del valle del río Tajo, diferenciando las principales subunidades geomorfológicas de la llanura de inundación, y del sector de la confluencia con el arroyo Melgar, tributario de segundo orden del río Tajo.

Se estudiaron un total de 15 perfiles edáficos: 7 en distintas posiciones de la llanura de inundación del río Tajo: tres de ellos correspondientes a suelos aluviales típicos situados en la zona central de la lla-

nura de inundación (Y-69, Y-70, Y-71), y 4 perfiles localizados en una depresión suave junto a un meandro abandonado (Y-65, Y-66, Y-67, Y-68), en el borde sur, cerca del escarpe de las primeras terrazas donde aflora el material yesífero del sustrato mioceno, de los cuales se ha seleccionado el perfil Y-66. Otros 8 perfiles (Y-21, Y-57, Y-55, Y-56, Y-60, Y-61, Y-62, Y-63) fueron estudiados en la llanura aluvial del curso bajo del arroyo Melgar, en la zonar de confluencia con el río Tajo, seleccionando para su muestreo el perfil Y-21, por ser el más representativo.

La descripción morfológica de los 15 perfiles en el campo se realizó según la normativa FAO (1977); el color en muestra seca y húmeda se determinó según Munsell Soil Color Charts (1990). Se tomaron muestras de cada horizonte en 5 perfiles representativos (Y-66, Y-69, Y-70, Y-71, Y-21), analizando (USDA, 1972) las siguientes propiedades: materia orgánica, pH, conductividad eléctrica en el extracto 1:2, carbonato cálcico equivalente y textura, y el extracto de saturación en tres de los perfiles (Y-66, Y-69, Y-21) (pH, conductividad, relación de adsorción de sodio (RAS), cationes y aniones). El estudio mineralógico se realizó por difracción de rayos X para las fracciones (< 2mm y <0.002mm) con un difractor Philips PV 1170. Se tomaron muestras sin disturbar en cuatro de los perfiles impregnándolas a vacío con cronolita 1008. Las láminas delgadas se estudiaron mediante microscopía de polarización, describiéndose según la terminología de Bullock *et al.*, (1985). La clasificación de los suelos se hizo según Soil Survey Staff (1999).

### 3. El área de estudio y las condiciones ambientales

#### 3.1 Contexto geológico y geomorfológico

El área de estudio se sitúa al sur de la provincia de Madrid, entre las ciudades de Aranjuez y Toledo (Fig.1). Geológicamente, se localiza en la Cuenca Terciaria de Madrid (Calvo *et al.*, 1989), que está rellena por materiales paleógenos, neógenos y cuaternarios. Los materiales cuaternarios están representados en gran parte por los depósitos fluviales del río Tajo, formados mayoritariamente por las terrazas y la llanura de inundación.

La litología de la cuenca de drenaje del río Tajo en este sector está constituida por los materiales miocenos, donde Calvo *et al.*, (1989) diferencian tres unidades: la unidad inferior constituida por arcillas y sales, la unidad intermedia formada por yesos y carbonatos y finalmente la unidad superior carbonatada. En el área de estudio afloran preferentemente los materiales salinos y yesíferos, destacando la unidad inferior, también llamada unidad salina (García del Cura *et al.*, 1979) constituida por arcillas con predominio de anhidrita, magnesita, polihalita, thenardita, glauberita y halita.

La llanura de inundación del río Tajo constituye una extensa unidad de morfología plana y mínima pendiente (0,2-0,4%) cuyas cotas varían entre 3 y 4 metros sobre el talweg. La variedad morfológica en la llanura está controlada por la dinámica del Tajo, que presenta un curso marcadamente meandriforme, por lo que los procesos de migración y abandono de canales fluviales generan una morfo-

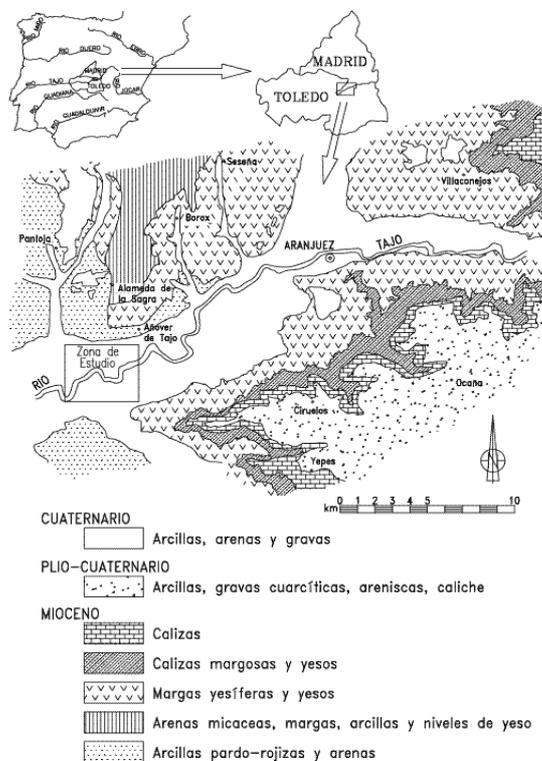


Figura 1. Localización del área de estudio y contexto geológico  
Figure 1. Location and geological framework of the study area

logía caracterizada por la presencia frecuente de meandros abandonados.

Las facies de llanura de inundación están formadas en general por depósitos de limos y arcillas con contenidos variables de arena, principalmente arena fina. La existencia de elementos más gruesos y la presencia de cantos es muy limitada, apareciendo algunas gravillas o algún canto de cuarcita.

En las zonas correspondientes a barras actuales o subactuales, predominan los depósitos arenosos y las gravas, y en los diques naturales o levees, no siempre bien representados a lo largo de todo el curso del río, se observan facies algo más groseras que las de la llanura de inundación.

En la desembocadura de los arroyos en la llanura, se generan abanicos aluviales que se superponen a las facies de llanura de inundación. El depósito depende entonces de la cuenca de drenaje de los citados cursos de agua. Cuando recorren zonas de terrazas, el sedimento es arenoso con un mayor contenido de elementos gruesos y cantos generalmente de cuarcita. Sin embargo en el sector estudiado los arroyos drenan los materiales yesíferos y salinos miocenos, por lo que el sedimento está constituido por materiales finos.

A pesar de la aparente homogeneidad o uniformidad de la llanura de inundación, la cartografía geomorfológica de detalle (1:20.000) permite diferenciar distintos subambientes o subunidades morfológicas que están representadas en el esquema geomorfológico de la Figura 2. En éste se observa la llanura de inundación encajada en el sistema de terrazas del río Tajo, y la posición de los perfiles dentro de cada subunidad: el perfil Y-69 dentro de la propia llanura, el Y-70 afectado por recubrimientos de un abanico aluvial a la salida del valle del río Melgar, el Y-71, en un nivel encajado de la llanura de inundación tras un levee, y la serie de perfiles Y-65, Y-66, Y-67, Y-68 junto a un meandro abandonado. Asimismo están los perfiles edáficos de la llanura aluvial del arroyo Melgar, cuyo perfil representativo es el Y-21.

En las llanuras aluviales de los ríos de segundo orden como el Melgar no se manifiestan las subunidades geomorfológicas indicadas para la llanura de inundación del río Tajo. En estos casos en la cartografía se ha considerado como una única unidad geomorfológica a la que denominamos llanuras aluviales, con características morfo-

lógicas similares a las llanuras de inundación de los grandes ríos, aunque con extensión superficial mucho menor. El Arroyo Melgar dreña una gran área fuertemente encajado en los materiales miocenos calizos en su cabecera, mientras que en su curso bajo discurre encajado en las terrazas del Tajo cuyo sustrato está constituido por materiales yesíferos. En la zona estudiada la llanura de inundación presenta pendientes longitudinales comprendidas entre el 1 y el 0,5% en la zona próxima a la confluencia con el Tajo. En las zonas laterales de la llanura, a los depósitos aluviales de inundación (limos, arcillas) se superponen depósitos de tipo coluvial que incorporan cantos de cuarcita y sílex y un mayor contenido de arena procedente de los materiales de las terrazas en las que se encaja el Melgar.

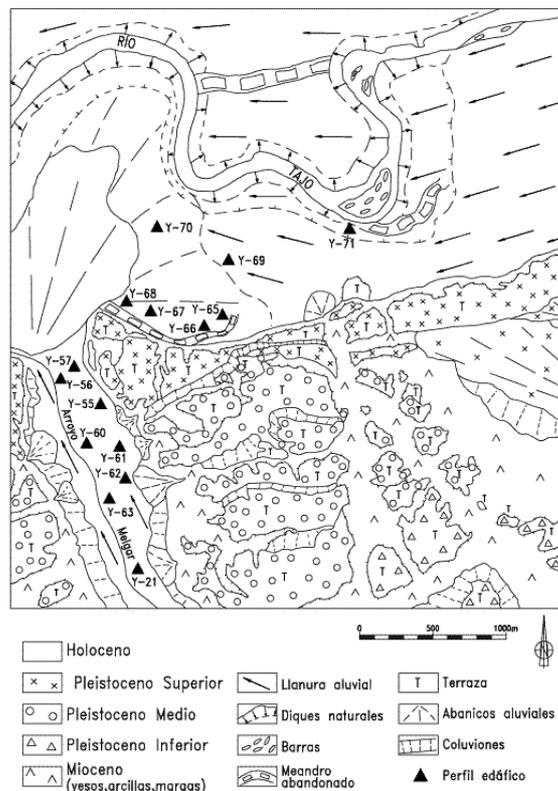


Figura 2. Contexto geomorfológico y situación de los perfiles estudiados

Figure 2. Geomorphological framework and location of studied soil profiles

### 3.2 Clima y Vegetación

Debido a la homogeneidad de los datos de las cinco estaciones meteorológicas del área de estudio, consideraremos los correspondientes a la estación meteorológica más cercana de Aranjuez, que reflejan una precipitación media de 427 mm, y una evapotranspiración de 758 mm. La ETP más alta se produce en los meses de Julio y Agosto, con valores de 132 mm, siendo la precipitación en estos meses en torno a 10 mm. Los meses de máxima precipitación son Diciembre, Febrero y Abril con valores en torno a 50 mm. Estos datos permiten clasificar el clima según Thornthwaite (1948) como DdB'1b'2, es decir, semiárido mesotérmico con pequeño exceso invernal, y fuerte concentración en verano.

Para los climas mediterráneos Emberger *et al.*, (1963) utilizan el diagrama ombrotérmico (Fig.3),

en el que un mes es seco o húmedo según que el valor de la temperatura en °C sea mayor o menor que el doble de la precipitación en mm. De acuerdo con esto se observa que el periodo seco comienza en Mayo y finaliza en Septiembre.

En la misma figura el balance de humedad (Thornthwaite, 1948) refleja un exceso invernal frente al déficit hídrico estival; los excesos son moderados (27 mm), y se producen en Febrero y Marzo; el déficit hídrico se inicia en el mes de Junio y finaliza en Octubre. Este balance de humedad determina un régimen de humedad de tipo Xérico (Soil Survey Staff, 1999).

La vegetación natural que corresponde a los suelos aluviales en la zona de estudio sería la «Populetales», en la que el género *Populus* predomina con *P. alba*, por la ligera salinidad existente; se asocian *Salix* sp y otros arbustos. Cuando la salinidad avanza, sobre todo por elevación del nivel

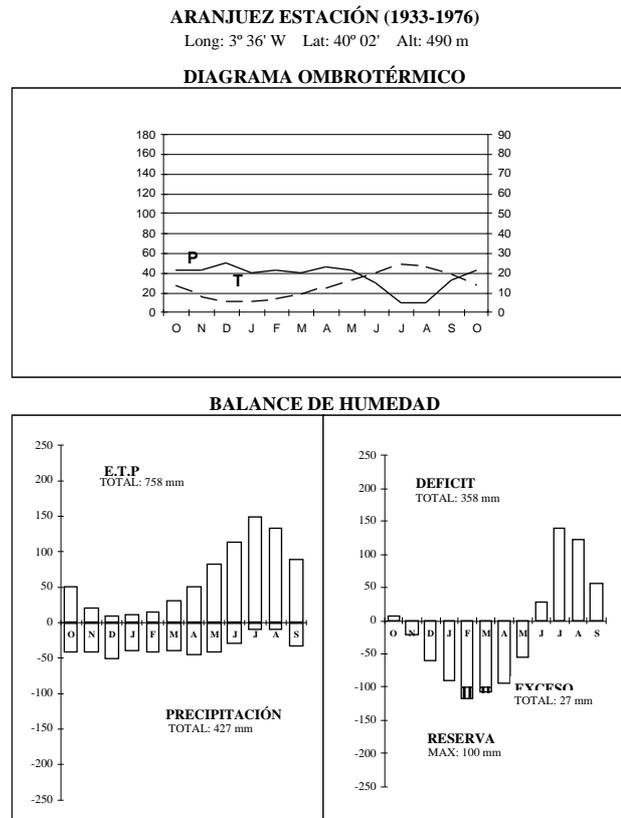


Figura 3. Diagrama ombrotérmico y balance de humedad. Estación termopluviométrica de Aranjuez  
 Figure 3. Ombrothermic diagram and soil water balance in Aranjuez meteorological Station

freático, aparece como especie arbórea el *Tamarix canariensis*, así como arbustos *Atriplex halimus*, y otras de menor porte como *Juncus Squarrosus* y en casos extremos *Arthrocnemum machrostachium*. La utilización bajo riego de estos suelos ha eliminado totalmente los primeramente citados en los suelos normales, y en las áreas extremadamente salinas persisten los segundos.

## 4. Resultados y Discusión

### 4.1 Morfología de los suelos

Existen dos tipos de secuencias de horizontes en los perfiles edáficos estudiados: una de tipo A-C, con la variante de tipo Ap-C en los suelos cultivados (perfiles Y-69, Y-70, Y-71) y otras de tipo A-Bzy-Czy (Y-66, Y-67, Y-57) o A-Bwy-Cy (Y-21, Y-55, Y-56, Y-57, Y-60, Y-61, Y-62, Y-63) que corresponden a las posiciones de drenaje deficiente, donde además puede aparecer el nivel freático a profundidades comprendidas entre 150 y 190cm.

En ambos tipos de secuencias es típica la presencia de límites netos e incluso abruptos entre los distintos subhorizontes C, como consecuencia de la superposición de distintos episodios sedimentarios. La gran homogeneidad granulométrica entre estos episodios, y la ausencia de elementos gruesos, hacen innecesario utilizar el prefijo numérico previo que marcaría un material original distinto. En la Tabla 1 figura una síntesis de las principales propiedades morfológicas de los perfiles seleccionados.

### 4.2 Propiedades físicas

Existe una uniformidad clara en las texturas de todos los perfiles, la clase textural predominante es la franco limosa (Soil Survey Staff, 1999) (Tabla 2). La fracción textural dominante es siempre el limo, (con valores próximos o superiores a 50%) seguido de la arcilla. De los perfiles de la llanura de inundación del río Tajo destaca el perfil Y-66 por un mayor contenido de limo y arcilla y mucho menor de arena fina, que los perfiles restantes. El perfil Y-21, representativo de todos los de la llanura del río Melgar, a pesar de mantener la misma tendencia que los anteriores, destaca por un conte-

nido algo mayor de arena gruesa y fina, así como por mayores contenidos de arcilla.

El predominio de las fracciones limo y arcilla, la ausencia de elementos gruesos, la inexistencia de arena gruesa, y las variaciones de la fracción arena fina, son características de los depósitos de llanura de inundación, y reflejan la dinámica sedimentaria de sucesivos aportes por ocupación de la llanura de inundación. Por tanto las texturas de estos suelos son de origen sedimentario y las variaciones en los contenidos de arcilla no reflejan una evolución edáfica, sino la herencia de los materiales depositados, al contrario de lo que ocurre en las inmediatas terrazas fluviales del Tajo, donde el contenido de arcilla está ligado a un origen claramente edáfico (Roquero et al., 1997).

En cuanto al poder retentivo para el agua, la capacidad de campo presenta como valor medio el 25% (valores extremos de 15 y 30%). La permeabilidad medida como conductividad hidráulica es lenta, 0,1 m/día (Van Beers, 1958), lo que explica en parte los procesos de elevación de la capa freática y los procesos de salinización correspondientes.

### 4.3 Propiedades físico-químicas

El contenido de materia orgánica (Tabla 2) es alto en los horizontes superficiales (y especialmente en los suelos no cultivados, perfil Y-66), y tiende a decrecer en profundidad. Sin embargo, en algunos casos presenta una distribución irregular (Perfil Y-70). Este comportamiento, junto con la existencia de contenidos superiores a 0,2 de carbono orgánico a más de 125 cm, determina el carácter fluvéntico de estos suelos (Soil Survey Staff, 1999).

El  $\text{CaCO}_3$  equivalente muestra también unas variaciones marcadas, siendo los contenidos más frecuentes entre 10% y 15%. Las variaciones en profundidad de estos contenidos no están relacionadas con el proceso de lavado, sino que son de origen sedimentario: los depósitos de los ríos de este sector meridional de la Cuenca de Madrid (Tajo y sus tributarios) muestran siempre altos contenidos de carbonato debido a la abundancia de materiales carbonatados en este sector de la cuenca.

Todos los suelos de la llanura de inundación muestran una tendencia alcalina, con valores de pH siempre superiores a 7,1. Cuando a la presencia de carbonatos se suma la de otras sales la reacción es

Tabla 1. Propiedades morfológicas (Abreviaturas de Soil Survey Staff 1951, Handbook 18, pp 139-140)  
 Table 1. Morphological properties (abbreviations from Soil Survey Staff, 1951, Handbook 18, p.139-140)

Perfil Clasificación	Horizonte	Prof. (cm)	Color (Húmedo)	Color (Seco)	Elem. Gruesos	Clase Textural	Estructura	Consistencia	Límite	Raíces
Y-66 Aquisalid Típico	Az	0-14	10YR 5/4	10YR 6/4	0	sil	m1bk	dh	cw	f1,2
	Bzy	14-62	7.5YR 5/4	7.5YR 7/4	0	sil	0	mfr	cw	m1,f2
	Czy1	62-100	10YR 5/4	10YR 7/4	0	sil	0	mfr	cw	m1
	Czy2	100-180	7.5YR 5/4	10YR 7/4	0	sil	0	wps		f1
Y-69 Xerofluent Típico	Ap1	0-20	10YR 4.5/3	10YR 6/3-4	1	sil	gr	mfi	cs	f1
	Ap2	20-31	10YR 8/3	10YR 8/2	2	sil	gr	mfi	cs	C2,f3
	C1	31-62	10YR 4/3	10YR 6/3	2	sil	0	mfi	cw	f3
	C2	62-85	10YR 5/3-4	10YR 6/4	0	1	0	mfi	as	C1
Y-70 Xerofluent Típico	C3	85-124	10YR 5/3-4	10YR 7/3-4	0	sil	0	mfr	ciw	C2
	C4	124-135	10YR 5/4	10YR 7/4-6	0	sil	0	mfr		f2
	Ap	0-22	10YR 5/3	10YR 6/3	0	sil	gr	mfr	cs	f3,1,2
	AC	22-40	10YR 5/4	10YR 6/4	0	sil	0	mfr	cs	f3c1
Y-71 Xerofluent Típico	C1	40-55	10YR 4/6	10YR 6/4	0	sil	0	mvfr	cs	f1
	C2	55-93	7.5YR 5/3-2	10YR 6/4	0	sil	0	mfr	cs	c2
	C3	93-144	7.5YR 5/3-4	10YR 6/4	0	sicl	0	mfr	cs	f1,2
	C4	144-210	10YR 6/4	10YR 7/4	0	sil	0	mfr	cs	f1,2
Y-71 Xerofluent Típico	Ap	0-15	7.5YR 6/3	10YR 6/4	1	sil	gr	dh	cs	cl,2
	AC	15-30	7.5YR 5/3-4	7.5YR 6/4	0	sil	0	dsh	cs	cl,2
	C1	30-45	7.5YR 5/3	7.5YR 6/6	0	sil	0	dsh	ai	c1
	C2	45-100	7.5YR 5/4	7.5YR 6/6	0	sicl	0	wps	a	c1
Y-21 Haploxerept Fluvéntico	C3	110-140	10YR 5/3-4	7.5YR 7/4-6	0	1	0	mfr	cs	m1,2
	C4	140-180	7.5YR 5/3	10YR 7/6	0	sil	0	mfr		f1
	Ap	0-8	10YR 5/2	10YR 5/3	0	sicl	fgr	mfr	cs	f1
	ABw	8-27	10YR 5/3	10YR 5/3	0	cl	f1sbk	dh	csw	f1,2
Fluvéntico	Bwy1	27-54	10YR 5/2	10YR 5/3	0	cl	m1sbk	dh		i
	Bwy2	54-115	10YR 5/3	10YR 6/3	0	sic	0	dvh		

Tabla 2. Datos analíticos y distribución granulométrica  
 Table 2. Analytical data and particle size distribution

Profundidad (cm)	Horizonte	pH (1:2)	CE(1:2) dS/m	CaCO <sub>3</sub> eq. %	MLO %	Textura (%)				
						A. gruesa 2-0,2	A. fina 0,2-0,05	Limo 0,05-0,002	Arcilla <0,0027	
<i>Perfil Y-66</i>										
0-14	Az	8,3	14,9	10,0	3,6	0,4	12,9	70,4	16,3	
14-62	Bzy	8,2	13,6	10,4	0,8	1,2	19,1	60,4	19,3	
62-100	Czy1	8,4	8,4	15,4	0,6	0,2	13,9	61,8	24,1	
100-180	Czy2	8,3	6,3	15,0	0,5	0,2	7,9	65,7	26,2	
<i>Perfil Y-69</i>										
0-20	Ap1	7,6	1,0	11,9	2,0	1,0	25,6	56,8	16,6	
20-31	Ap2	7,5	0,96	11,9	1,9	1,6	26,8	52,2	19,4	
31-62	C1	7,5	0,90	11,2	1,5	2,1	28,8	51,7	17,4	
62-85	C2	7,7	0,53	12,5	0,7	0,6	38,7	48,4	12,3	
85-124	C3	7,7	0,64	11,9	0,7	0,2	18,2	59,7	21,9	
124-135	C4	7,8	0,48	15,0	0,6	0,3	28,1	56,5	15,1	
<i>Perfil Y-70</i>										
0-22	Ap	7,9	0,63	12,5	1,8	0,6	22,2	56,4	20,8	
22-40	AC	7,9	0,54	10,6	1,1	0,5	24,5	52,4	22,6	
40-55	C1	7,9	0,48	13,4	0,7	0,7	35,9	50,5	12,9	
55-93	C2	7,7	0,61	12,5	1,1	0,5	17,5	61,5	20,5	
93-144	C3	7,8	0,47	13,1	0,9	0,2	5,8	66,8	27,2	
144-210	C4	7,9	0,38	19,4	0,6	0,2	30,2	55,1	14,5	
<i>Perfil Y-71</i>										
0-15	Ap	7,3	0,69	11,2	2,0	1,7	20,9	54,7	22,7	
15-30	AC	7,5	0,63	10,6	1,6	1,1	20,5	56,1	22,3	
30-45	C1	7,6	1,16	14,1	1,3	0,5	18,0	60,8	20,7	
45-100	C2	7,6	0,97	11,9	1,4	0,2	2,1	58,0	39,7	
110-140	C3	7,9	0,54	16,9	0,6	2,8	45,6	38,3	13,3	
140-180	C4	7,7	0,92	14,4	0,7	1,6	29,6	52,2	16,6	
<i>Perfil Y-21</i>										
0-8	Ap	7,3	2,18	11,6	2,0	5,4	10,8	49,4	34,4	
8-27	ABw	7,1	2,45	10,5	1,9	7,9	14,7	43,6	33,8	
27-54	Bwy1	7,2	2,65	10,2	1,6	7,4	15,5	41,8	35,3	
54-115	Bwy2	7,3	2,93	9,1	1,4	2,9	8,7	44,7	43,7	

marcadamente alcalina, alcanzándose valores de pH superiores a 8, como es el caso del perfil Y-66 situado en un área deprimida dentro de la llanura de inundación del río Tajo.

#### 4.4 Salinidad

La conductividad eléctrica en el extracto 1:2 (Tabla 2), indica contenidos en sales de moderados a altos en los suelos típicamente aluviales (muy ligeramente salinos, según la clasificación USDA de la salinidad) (Y-69, Y-70, Y-71) y un contenido muy alto en el perfil Y-66 (fuertemente salino). El perfil Y-21 representa el punto intermedio entre los dos casos anteriores. La Tabla 3 muestra los datos del extracto de saturación de los perfiles seleccionados analizados.

El perfil Y-66 muestra un predominio de los iones sulfato y magnesio, seguidos por un elevado contenido de cloruro y sodio, y valores de conductividad eléctrica muy superiores a los requerimientos de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999), en un espesor total de 100 cm, lo que determina la existencia de un horizonte sálico diagnóstico.

Sin embargo los contenidos de yeso en los horizontes analizados, alcanzan apenas el 1% (a pesar de la evidencia manifiesta en la descripción morfológica del yeso vermiforme en el perfil), por lo que no reúnen los requisitos necesarios de la Soil Taxonomy (SSS, 1999) (que exige al menos un contenido de yeso secundario de un 5% en peso) para la caracterización del horizonte gypso diagnóstico.

En cuanto a la alcalinidad de este perfil, es habitual que con tan grandes concentraciones salinas y presencia de sodio abundante, el suelo resulte alcalino (según la normativa USDA, Richards, 1954), puesto que la relación de absorción del sodio (RAS) del extracto de saturación supera el 13%, y el porcentaje de sodio intercambiable es mayor del 15%.

En el perfil Y-69 representativo de los suelos aluviales típicos se observa un predominio del calcio, si bien el sodio y el magnesio tienen también un papel importante, al igual que el ión sulfato que predomina sobre el cloruro. Es preciso advertir que estos suelos se riegan de modo intensivo desde hace más de veinte años con agua del río Tajo, cuyo contenido salino es moderado (conductividad eléctrica

de 1.31 dS/m, y RAS 1.9; Namesny, 1993) lo que determina tanto la ligera salinidad existente como el equilibrio iónico de los suelos aluviales normales.

El perfil Y-21 presenta características intermedias entre los dos casos anteriores, aunque en este caso los valores de la conductividad eléctrica están influenciados por una moderada presencia de yeso y una presencia relevante del sulfato magnésico.

#### 4.5 Mineralogía y Micromorfología

La Tabla 4 muestra la mineralogía presente en tres perfiles. En el polvo total dominan en general el cuarzo y los filosilicatos, con una importante presencia de calcita y dolomita, heredadas de los materiales carbonatados del Mioceno superior de la cuenca; el yeso aparece como trazas en algunos de los horizontes (perfil Y-21) que presentan yeso vermiforme. En la fracción arcilla se observa un comportamiento muy semejante en los tres perfiles: en general domina la illita, con contenidos en torno al 70%. La esmectita aparece en proporciones variables, sin embargo, al igual que para la illita y la caolinita, su origen debe ser heredado, puesto que en los materiales arcillosos miocenos de la unidad inferior e intermedia de la cuenca aparece en proporciones importantes (Calvo *et al.*, 1989). Sí conviene destacar que la esmectita que aparece en el perfil Y-66 es de tipo sódico (saponita).

Los rasgos micromorfológicos más frecuentes en las muestras estudiadas están asociados a estructuras heredadas del material original, actividad biológica y traslocación de yeso. La figura 4a muestra una estructura laminar constituida por bandas de distinta granulometría y paralelas a la superficie, a la que se superponen grietas y poros planares. En la 4b se observa una estructura con canales entre granos. La presencia de estos canales se asocia a actividad biológica, y más probablemente a raíces. En otros casos la actividad biológica se manifiesta por la presencia de edaforrasgos arqueados (4c) atribuible a actividad de fauna.

En cuanto a las traslocaciones de yeso, la figura 4d muestra un relleno denso completo de yeso. El pequeño tamaño cristalino no permite observar la morfología de cristales individuales, sin embargo la forma del edaforrasgo permite asignarle un origen claramente edáfico, correspondiendo al yeso vermiforme descrito en el campo.

Tabla 3. Resultados analíticos del extracto de pasta saturada (\*:obtenido por diferencia)  
 Table 3. Analytical data from soil paste saturation extract

Profundidad	Horizonte	Hs (%)	pH	CE dS/m	RAS	Cationes (meq/l)					Cationes (meq/l)				
						Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Σ	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> H <sup>-</sup>	Σ	
<i>Perfil Y-66</i>															
0-14	Az	55,7	7,5	56,2	19,4	8,0	345,5	258,8	9,1	621,4	241,4	358,1	0,8	600,3	
14-62	Bzy	48,0	6,7	57,8	14,4	10,0	401,3	206,1	0,8	618,2	103,5	507,8	0,7	612,0	
62-100	Czy1	52,7	6,8	33,5	11,2	12,5	238,0	125,8	0,3	376,6	73,6	319,1	0,8	393,5	
100-180	Czy2	57,8	7,0	19,8	10,3	13,2	125,2	86,0	0,2	224,6	30,4	183,2	0,8	214,4	
<i>Perfil Y-69</i>															
0-20	Ap1	46,5	7,0	3,4	2,2	19,0	9,5	8,2	2,5	39,2	10,8	28,1	0,4	39,3	
20-31	Ap2	47,4	7,2	2,6	2,4	12,5	8,5	8,1	1,8	30,9	7,4	22,8	0,4	30,6	
31-62	C1	47,8	7,2	2,3	2,6	11,0	8,3	8,1	1,0	28,4	5,3	22,7	0,4	28,4	
62-85	C2	45,9	7,2	1,8	1,8	6,7	7,0	4,9	0,5	19,1	4,3	17,9	0,3	22,5	
85-124	C3	50,7	6,7	1,7	2,0	6,2	6,4	5,0	0,5	18,1	4,9	15,9	0,3	21,1	
124-135	C4	48,5	7,3	1,3	1,8	4,2	6,7	4,2	0,2	15,3	4,4	16,6	0,3	21,3	
<i>Perfil Y-21</i>															
0-8	Ap	71,0	7,5	3,07	0,75	22,1	19,0	3,4	0,8	45,2	2,6	40,9*	1,7	45,2	
8-27	ABw	53,0	7,3	3,56	0,94	24,5	24,5	4,7	0,7	54,4	3,4	49,0*	2,0	54,4	
27-54	Bwy1	61,5	7,3	4,16	2,66	20,3	20,3	12,0	0,5	53,1	3,1	48,3*	1,7	53,1	
54-115	Bwy2	67,5	7,3	4,87	4,20	19,0	19,0	18,3	0,4	56,7	6,1	48,4*	2,2	56,7	

Tabla 4. Análisis mineralógico semicuantitativo (Q=cuarzo; F=feldespatos; Ca=calcita; Do=dolomita; Ph=filosilicatos; K=kaolinita; I=illita; S=smectita; Cl= clorita; n.p. ausente)

Table 4. Semicuantitative mineralogical composition (Q=quartz; F=feldspars; Ca=calcite; Do=dolomite; Ph=phyllosilicates; K=kaolinite; I=illite; S=smectite; Cl= clorite; n.p. not present)

Profundidad (cm)	Horizonte	Polvo total (%) < 2 mm					Fracción arcilla (%) < 2 $\mu$ m			
		Q	F	Ca	Do	Ph	K	I	S	Cl
<i>Perfil Y-66</i>										
14-62	Bzy	25	12	10	6	47	17	78	5	n.p.
62-100	Czy1	24	13	12	5	46	11	80	9	n.p.
<i>Perfil Y-69</i>										
20-31	Ap2	38	5	13	3	41	12	73	15	n.p.
31-62	C1	23	10	8	1	50	12	74	14	n.p.
<i>Perfil Y-21</i>										
8-27	ABw	47	3	33	12	5	14	70	16	n.p.
27-54	Bwy1	20	15	10	2	53	6	73	21	n.p.
54-100	Bwy2	13	8	9	5	64	5	83	12	n.p.

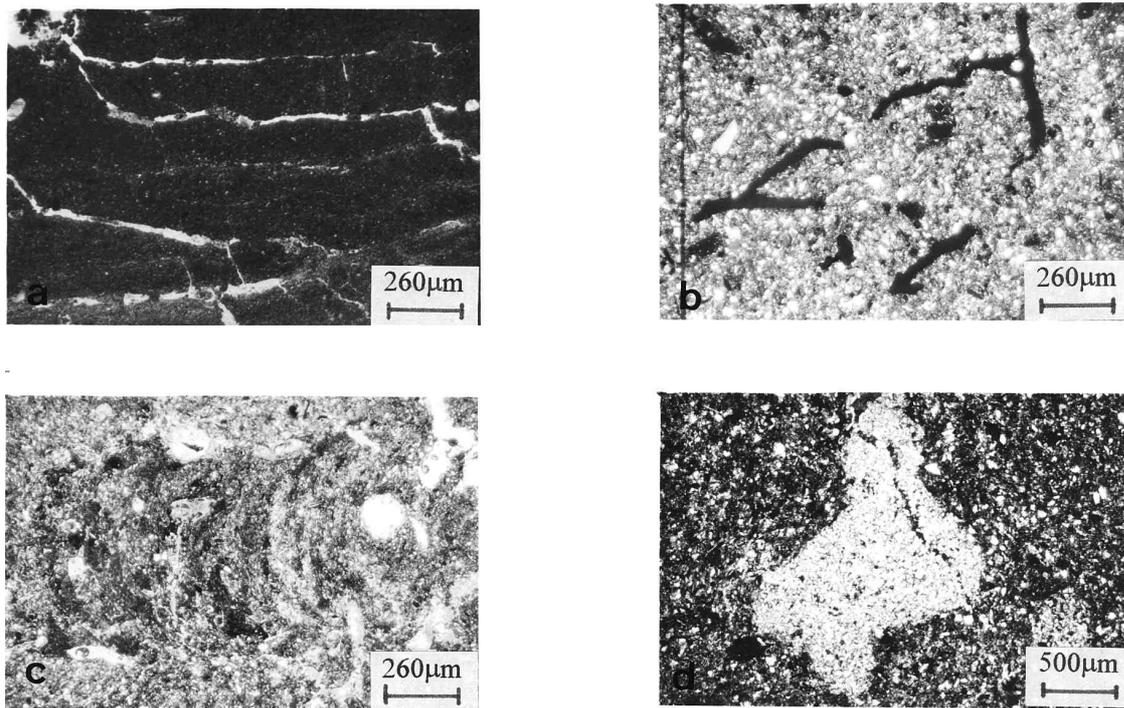


Figura 4. Micromorfología de los perfiles Y-66, Y-69, Y-71. a. Perfil Y-71: horizonte C2 (45-100 cm): estructura laminada en bandas de distinta granulometría. b. Perfil Y-69, horizonte C2 (62-85 cm): microestructura con canales entre granos. c. Perfil Y-66, horizonte Bzy (14-62 cm): edaforrasgo arqueado asociado a la actividad de fauna. d. Perfil Y-66, horizonte Bzy (14-62 cm). Relleno denso completo de yeso secundario, manifestación micromorfológica de la configuración del yeso vermiforme descrito en campo.

Figure 4. Micromorphology of profiles Y-66, Y-69, Y-71. a. Profile Y-71: Horizon C2 (45-100 cm): (crossed polarizers) banded distribution and straight planar voids. (1 cm. 260 micras) and straight planar voids. b. Profile Y-69, Horizon C2 (62-85 cm) (crossed polarizers). Intergrain channel microstructure. c. Profile Y-66, Horizon Bz (14-62 cm) (crossed polarizers). Crescent or bow like arrangement of constituents commonly found in soils with high biological activity. d. Profile Y-66, Horizon Bz (14-62 cm) (crossed polarizers). Dense complete infilling of gypsum associated to channel roots corresponding to vermiform gypsum in the field description

## 5. Conclusiones

En la llanura de inundación del Tajo y su afluente el río Melgar, los procesos de hidromorfía son los habituales en las unidades geomorfológicas constituídas por depósitos finos, debido a las oscilaciones del nivel freático. En el caso que nos ocupa esta tendencia está sustituida por salinidad y acumulación de yeso, apareciendo perfiles con horizontes genéticos de acumulación de sales y de yeso, a pesar de que la dinámica fluvial ha actuado hasta hace unas décadas. La génesis de estos procesos está condicionada por los siguientes factores:

La fuente de las sales: está constituida por los materiales salino yesíferos miocenos que suministran las sales, ya sea por aportación directa a través de la circulación de aguas superficiales y subsuperficiales, o por vía indirecta, a través de los sedimentos de los conos y abanicos aluviales que se superponen a la llanura de inundación. La riqueza de sales magnésicas y sódicas de la litología miocena es la causa del dominio de ambos iones en los suelos de este área.

Las condiciones áridas de la zona de estudio y el nivel freático cercano a la superficie (150-190 cm), provocan que la evaporación sea superior a la recarga, generándose un movimiento ascendente por capilaridad, favorecido por las finas texturas de los suelos. Los horizontes donde se acumulan las sales o el yeso, se desarrollan en la zona intermedia de los movimientos ascendentes y descendentes del agua. En la evolución hacia la salinidad en este área interviene de forma decisiva la puesta en riego que favorece el ascenso del nivel freático y sus oscilaciones.

La particularidad del contexto geomorfológico: los valles estudiados del río Tajo y del río Melgar están encajados en el sustrato mioceno salino-yesífero. Las formas del relieve de la llanura de inundación en detalle del río Tajo, determinan grandes diferencias en la génesis de los perfiles: en las zonas llanas con cota algo más elevada que los canales abandonados de los antiguos meandros, dominan los suelos aluviales típicos frente a suelos salinos e incluso alcalinos de las segundas posiciones. El caso de la llanura aluvial del Melgar, de menor rango que la del río Tajo, constituye un ejemplo adicional de la susceptibilidad a la génesis de acumulaciones de yeso y sales más solubles en

este área, provocadas por las dificultades del drenaje interno de los perfiles del suelo y del desagüe o drenaje externo en los perfiles localizados en áreas deprimidas, así como por la proximidad del sustrato yesífero al estar encajadas en un estrecho valle fluvial.

Partiendo de los factores mencionados, y de acuerdo con la caracterización de suelos realizada, los perfiles Y-69, Y-70 e Y-71, se clasifican (Soil Survey Staff, 1999) como Xerofluvents Típicos en los que la evolución edáfica es impedida por la dinámica propia de la sedimentación fluvial. La principal propiedad diagnóstica en el perfil Y-66 (y del resto de perfiles con igual secuencia de horizontes) es la presencia de un horizonte diagnóstico sálico, y por tanto se clasifica como Aquisalid Típico. Por último el perfil Y-21 (y los perfiles con igual secuencia de horizontes) corresponde a un Haploxerept fluvéntico, donde a pesar de la presencia manifiesta del yeso vermiforme, no se alcanzan los contenidos requeridos de yeso total para la existencia de un horizonte gípsico diagnóstico.

Los resultados obtenidos muestran las posibilidades de la aplicación de la cartografía geomorfológica de detalle en el diagnóstico de la salinidad: aunque existan las condiciones generales para su presencia (litología suministradora de sales y clima de tendencia árida) en todo este sector del valle del Tajo la salinidad no es generalizada. Sin embargo, las condiciones de salinización extrema aparecen ligadas a aspectos muy particulares resultado de la combinación directa de la morfología, los depósitos y el drenaje, que son los aspectos controlados por el factor geomorfológico.

La aplicabilidad de estos conceptos geomorfológicos a la cartografía de suelos aluviales, de cuencas terciarias con amplio desarrollo de materiales yesíferos, con condiciones climáticas e hidrológicas semejantes, permite determinar «a priori» la áreas donde los suelos están afectados por acumulación de yesos y de sales, hecho de gran importancia económica en áreas de regadío.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente subvencionado por el Proyecto FEDER nº1FD97-0222

## Referencias bibliográficas

- Bridges (1987). Some Characteristics of Alluvial Soils in the Trent Valley, England. In: *Alluvial Soils* (John Gerrard, Ed.). Van Nostrand Reinhold Company, 226-232.
- Bullock, P.; Fedoroff, N.; Jongerius, A.; Stoops, G.; Tursina, T. (1985). *Handbook for soil thin section description*. Wayne Research Publications. United Kingdom, 150 pp.
- Calvo, J.P.; García Del Cura, M.A.; Hoyos, M.; Alonso-Zarza, A.M.; Sanz, E.; Rodríguez Aranda, J.P. (1989). Sedimentología de los complejos lacustres miocenos de la Cuenca de Madrid. *Acta Geológica Hispánica*, 24, 3-4, 281-298.
- Emberger, L.; Gaussen, H.; Kassas, M.; De Philippis, A.; Bagnouls, F. (1963). Carte Bioclimatique de la région méditerranéenne. *Recherches sur la zone aride*, XXI. F.A.O.
- FAO. (1977). *Guía para la descripción de perfiles de suelo*. Roma. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 70 pp.
- García del Cura, M.A.; Ordóñez, S.; López-Aguayo, F. (1979). Estudio petrológico de la Unidad Salina de la Cuenca del Tajo. *Estudios. Geol.*, 35, 325-339.
- Holmes, D.A.; Western, S. (1969). Soil Texture patterns in the Alluvium of the Lower Indus Plain. *Jour. Soil Sci.* 20, 23-37.
- Munsell Color. (1990). *Munsell Soil color charts*. Macbeth Division of Kollmorgen Instruments Corporation. Baltimore, Maryland.
- Laya, H. (1989). *Génesis, propiedades tecnológicas y posibilidades de utilización de los suelos salinos de la Cuenca del Duero y del Tajo, con énfasis en los suelos yesíferos*. Tesis Doctoral. Univ. Politécnica de Madrid. 356 pp.
- Namesny Vallespir, A. (1993). *Clasificación de la aptitud para riego de las aguas superficiales de España Peninsular, en función de los procesos de salinización y sodificación*. Tesis Doctoral. Univ. Politécnica de Valencia.
- Pérez Arias, J.; Bienes Allas, R.; Roquero, C. (1984). Secuencia típica de suelos de la comarca natural «Cerrato» (Palencia). En: *I Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Madrid*. Vol.2, 785-796.
- Porta, J.; López Acevedo, M.; Roquero, C. (1977). Morfometría y clasificación de algunos Gypsiorthids en España. *Anales INIA* 5: 85-111.
- Richards, L.A. (1954). *Diagnosis and improvement of Saline and alkali soils*. Agriculture Handbook nº60. U.S.S.L. Staff. U.S.D.A. Washington., 160 pp.
- Roquero, E. (1994). *Relación suelos-geomorfología en el sector centro-meridional de la Cuenca de Madrid*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. 550 pp.
- Roquero, E.; Pérez Arias, J. (1996). Influence of slope degree and orientation on geomorphological and pedological differences on gypsiferous soils from Miocene formations in Central Spain. En: *Proceedings of the International Symposium on Soils with Gypsum*, 56. Lleida, Catalonia, Spain.
- Roquero, E.; Goy, J.L.; Zazo, C. (1997). Nuevos índices cronológicos de evolución de los suelos en terrazas fluviales. *Estudios Geol.*, 53, 3-15.
- Soil Survey Staff. (1951). *Soil Survey Manual*. USDA. Agr. Handbook No.18. U.S. Government Printing Office, Washington D.C., 503 pp.
- Soil Survey Staff (SSS). (1999). *Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. Second Edition. U.S.D.A., N.R.C.S. Agriculture Handbook 436. U.S. Gov. Print. Off. 869 pp.
- Thornthwaite, C.W. (1948). An approach towards a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 38, 55-94.
- U.S.D.A. (1972). *Soil Survey laboratory methods and procedures of collecting soil samples*. Soil investigations Rep. No 1. Washington.
- Vallaray, G. (1987). Salt accumulation processes in the Hungarian Danube Valley. In: *Alluvial Soils*, (John Gerrard, Ed.). Van Nostrand Reinhold Company. 36-45
- Van Beers, W.F.J. (1970). *The Auger-Hole method*. ILRI. Wageningen, 32 pp.

Enviado el 24 de mayo de 2001  
Aceptado el 11 de octubre de 2001