

PROPIEDADES FÍSICAS DE SUELOS DESARROLLADOS SOBRE MARGAS EOCENAS EN LA VAL ANCHA DE JACA

José Ramón DOZ¹
David BADÍA¹

RESUMEN.— En este artículo se caracterizan los suelos a lo largo de una toposecuencia en la Val Ancha de la cuenca de Jaca (Huesca), desarrollada sobre margas eocenas. Se eligen cinco perfiles de suelos con sus horizontes (33), además de bloques (18) inalterados de margas. Los suelos presentan una expansibilidad media (a través del coeficiente de extensibilidad lineal), con cambios de volumen del 20% o inferiores. El límite líquido y el índice de plasticidad advierten de que son suelos con una baja a moderada plasticidad. Los agregados del suelo muestran, a través del test de Emerson de coherencia, una parcial o total dispersión en agua. Los valores del índice líquido indican que tienen un comportamiento como sólido frágil. La mayoría de bloques de margas se fragmentan tras un único ciclo de humectación-secado de los mismos. Este ciclo, combinado con otros tres sucesivos de congelación-descongelación, produce la rotura mayoritaria de los bloques. Además, el índice de subsidencia es entre moderado y alto (de 0,7 a 1,4) en los horizontes caracterizados, todo lo cual explica su alta capacidad para meteorizarse en las condiciones climáticas actuales.

ABSTRACT.— This work intends to describe the characteristics of the soils in the Val Ancha of Jaca Basin (Huesca), over a toposequence developed on Eocene marls. Five soil profiles with identified horizons (33) and unaltered

Recepción del original: 6-11-2017

¹ Departamento de Ciencias Agrarias y del Medio Natural. Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza. Carretera de Cuarte, s/n. E-22071 HUESCA. jose.doz1008@gmail.com, badia@unizar.es

marl blocks (18) were selected. Soils have an average expandability (through the Linear Extensibility Coefficient), with volume changes of 20% or lower. The Liquid Limit and the Plasticity Index show that these soils have a low to moderate plasticity. The soil aggregates show, through the Emerson Test of coherence, a partial or total dispersion in water. The values of the liquid limit indicate that they behave as a fragile solid. Most marl blocks are fractured after a single wetting-drying cycle, and break after a similar cycle, combined with three freeze-thaw cycles. In addition, the Subsidence Index shows moderate and high (from 0.7 to 1.4) values in the characterized horizons, all of which explains its high capacity to be altered in current climatic conditions.

KEY WORDS.— Blue marl, eocene, landscape, inner depression altoaragonesa, vertic horizon, Val Ancha, Jaca (Spain).

INTRODUCCIÓN

Las margas eocenas y los paisajes de cárcavas desarrollados sobre ellas son característicos de la depresión interior de los Pirineos centrales, donde llegan a ocupar unos 100 km² (IGN, 2006). Presentan una rápida respuesta frente a los procesos de meteorización que dan lugar a tasas de erosión de hasta 29 mm/año en laderas convexas (NADAL-ROMERO, 2011). La investigación sobre este tipo de materiales se ha centrado tradicionalmente en la erosión y la evolución de sus formas en función de los cambios en los usos del suelo y de la cobertura vegetal (GALLART y cols., 2013; GARCÍA-RUIZ, 2010). Así REGÜÉS y GALLART (2004) indican que la formación de *badlands* es el producto de dos propiedades: la temperatura, que causa la meteorización del regolito y la formación de sedimentos, y la humedad, que produce la erosión y la escorrentía. También REGÜÉS y cols. (2009) señalan que la producción de sedimentos en las cárcavas depende principalmente de la intensidad con que actúan los procesos de meteorización física asociada a la acción del hielo-deshielo. Los suelos desarrollados sobre estos sedimentos, resultantes de la alteración de las margas, una vez adquieren estabilidad morfológica son apreciados por los agricultores (GUERRA y MONTURIOL, 1970), si bien su manejo es algo complejo. También se reconocen problemas en la ingeniería civil relacionados con cierta capacidad para contraerse e hincharse (DE JONG y cols., 1992; THOMAS y cols., 2000). El fenómeno de contracción-expansión modifica drásticamente la capacidad de infiltración del suelo: muy elevada en verano y muy lenta en invierno (SOLÉ y cols., 1992). Además, algunas margas son muy susceptibles de dispersarse y alterarse (DE SANTIS y cols., 2010; SUMMA y cols., 2007). En algunas margas,

esta alta capacidad de dispersión se ha relacionado con la sodicidad (FAULKNER y cols., 2003; DE SANTIS y cols., 2010); en otras, con la mineralogía (KASANIN-GRUBIN, 2013; PARDINI, 2003). En otros casos, la dispersión se ha vinculado con procesos de congelación (NADAL-ROMERO y cols., 2007; PARDINI, 2003; PARDINI y cols., 1996; REGÜES y cols., 2000; VERICAT y cols., 2014).

En este artículo se caracterizan perfiles de suelos desarrollados sobre margas eocenas en una ladera de la Val Ancha de Jaca, con especial énfasis en sus propiedades físicas. Además, se evalúa la estabilidad de dichas margas frente a la meteorización física sometiéndolas a ciclos de congelación y humectación.

MATERIAL Y MÉTODOS

Zona de estudio

Se estudian cinco perfiles de suelos a lo largo de una toposecuencia, desde una ladera cóncava a un fondo de valle, al sur de la localidad de Gracónepel, en la Val Ancha de Jaca (figs. 1 y 2).

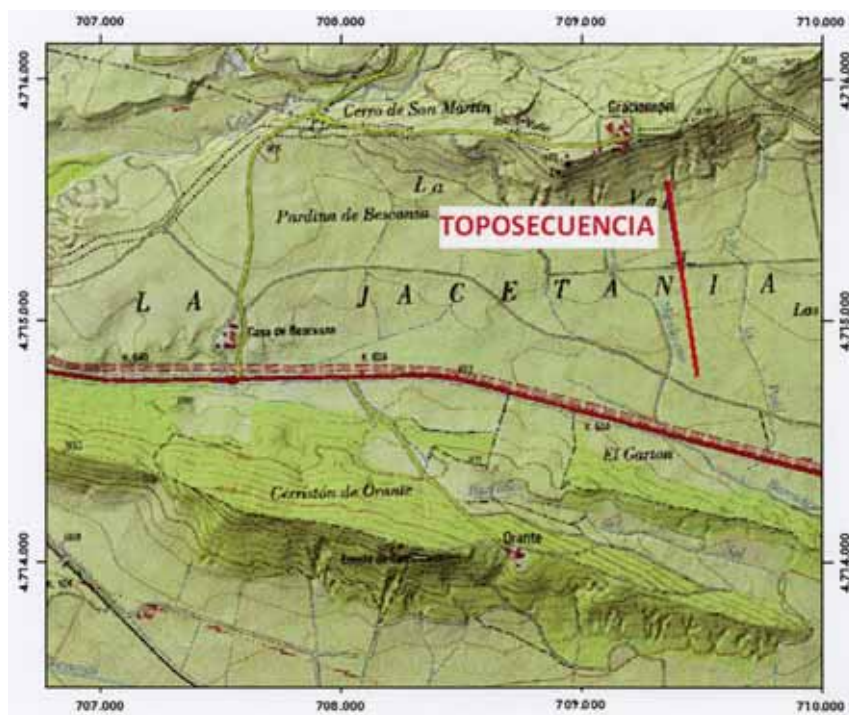


Fig. 1. Localización de los perfiles estudiados.

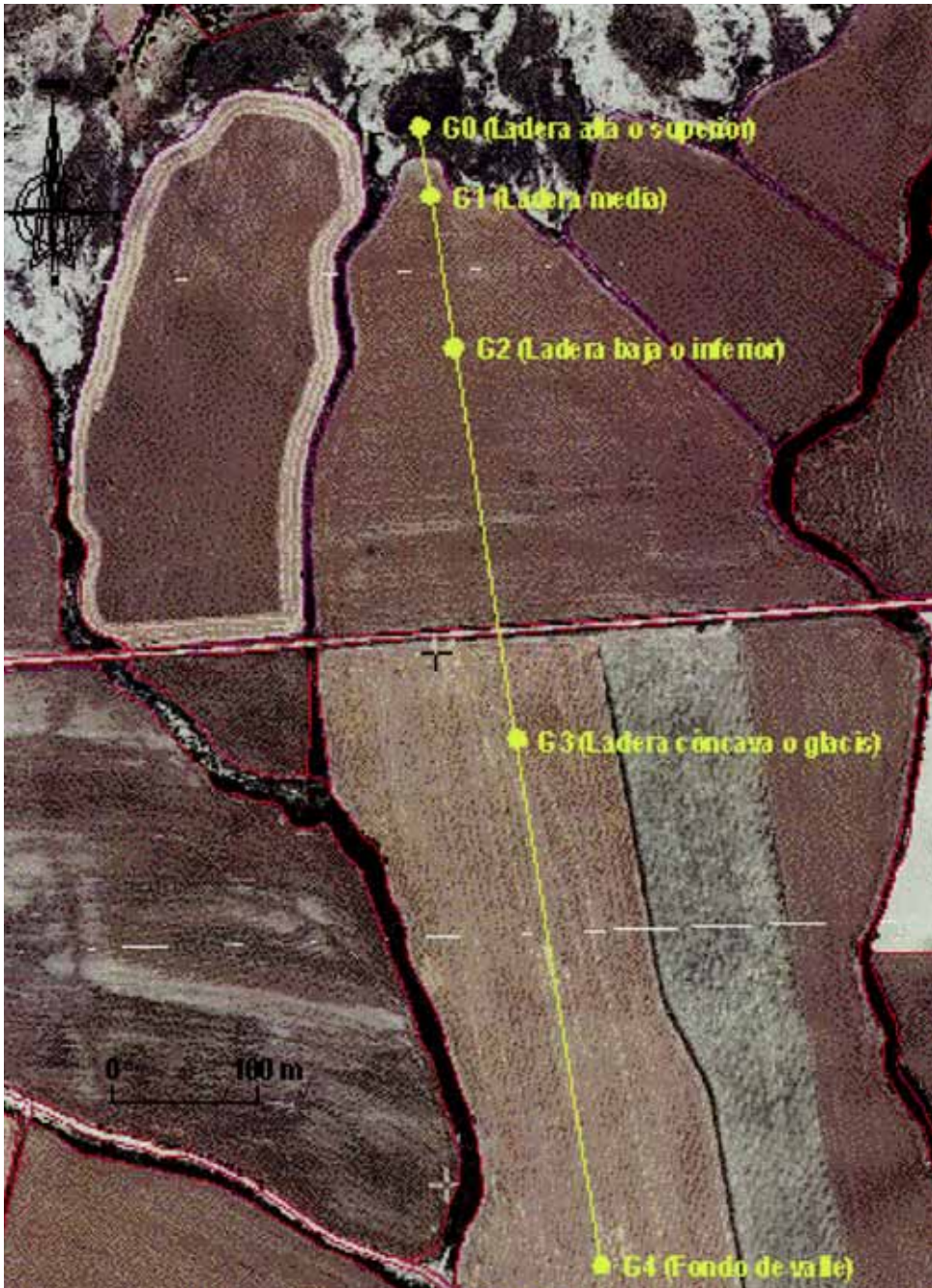


Fig. 2. Emplazamiento de los perfiles estudiados.

La tabla I muestra las coordenadas topográficas de la toposecuencia. La litología de la zona está dominada por las margas eocenas, intensamente plegadas y muy susceptibles a la meteorización y posterior erosión (MONTES, 2009). Al pie de los afloramientos de margas, con densas redes de drenaje en forma de cárcavas, aparecen los depósitos cuaternarios en fondos de valle.

La zona de muestreo se ubica entre los barrancos de Mirabueno (oeste) y de La Paúl (este), que vierten sus aguas al barranco del Ibón. Este es afluente por la margen izquierda del río Tulivana, que desemboca en la margen derecha del río Gállego, al sur de la presa del embalse de Sabiñánigo (CHE, 2007).

El clima tiene una marcada estacionalidad, propiamente mediterránea, pero con cierta influencia continental y atlántica, definiéndose como submediterráneo de montaña (CREUS y GIL, 2001). Este clima con estaciones contrastadas facilitaría la meteorización del material parental (BEGUERÍA, 2005).

La toposecuencia se dispone sobre campos de cereal de invierno, a excepción del más elevado, con boj (*Buxus sempervirens*). Las masas forestales se han reducido mucho por la acción antrópica en el territorio, sobre todo para el uso agrícola, mediante la concentración parcelaria de 1970.

Tabla I. Coordenadas de las calicatas de la toposecuencia. Huso 30; Datum ETRS89. Distancias, en metros. (Fuente: SigPac, MAPAMA)

		X	Y	Z
G0	Ladera alta o superior	709 244	4 715 364	910
G1	Ladera media	709 252	4 715 316	900
G2	Ladera baja o inferior	709 269	4 715 212	890
G3	Ladera cóncava o glacis	709 312	4 714 942	875
G4	Fondo de valle	709 371	4 714 580	865

Metodología

En este artículo se han determinado los siguientes parámetros: coeficiente de extensibilidad lineal (COLE); límites de Atterberg: límite líquido (LL), límite plástico (LP) e índices relacionados (de subsidencia, plasticidad y

consistencia); test de Emerson de coherencia de agregados al agua; y ciclos de congelación-descongelación y de humectación-secado. Se dan algunos detalles de su significado y determinación.

- 1) Coeficiente de extensibilidad lineal (COLE). Se basa en la diferencia de longitud entre las muestras de suelo en estado húmedo y la longitud de muestras de ese mismo suelo en estado seco (VALERA y cols., 2006). El Soil Survey Laboratory (1996) considera que esta forma de calcularlo no puede aplicarse a suelos que presentan contracción irreversible como en algunos Andisoles y suelos orgánicos (turberas o Histosoles). Dicho laboratorio, para suelos que no tienen fragmentos de roca, utiliza la relación entre las densidades aparentes del suelo a capacidad de campo y secado al horno a una temperatura de 105 °C durante 24 horas.
- 2) Límites de Atterberg, límite líquido y límite plástico, que se realizan mediante el método de Casagrande:
 - a) Límite líquido. Se define como el contenido en humedad donde el suelo pasa de tener una consistencia líquida a una consistencia plástica, o bien como la humedad que tiene un suelo amasado con agua y colocado en una cuchara normalizada (cuchara de Casagrande), y cuando un surco, realizado con un acanalador normalizado, que divide dicho suelo en dos mitades, se cierra a lo largo de su fondo en una distancia de 13 milímetros, tras haber dejado caer veinticinco veces la mencionada cuchara desde una altura de 10 milímetros sobre una base también normalizada, con una cadencia de dos golpes por segundo (UNE 103-103-94). CASAGRANDE (1932) determina que el límite líquido es una medida de resistencia al corte del suelo a un determinado contenido de humedad y que a cada golpe necesario para cerrar el surco corresponde un esfuerzo cortante cercano a 1 g/cm².
 - b) Límite plástico. Se define como el contenido de agua donde los suelos pasan de un estado semisólido al estado plástico, o bien como la humedad más baja donde pueden formarse con el suelo cilindros de 3 milímetros de diámetro, rodando dicho suelo entre los dedos de la mano y una superficie lisa, hasta que los cilindros empiecen a resquebrajarse (UNE 103-104-93).

- 3) Índices. El índice de subsidencia (n) caracteriza la relación entre el porcentaje de agua en el suelo bajo condiciones de campo y sus porcentajes de arcilla inorgánica y humus (PONS y cols., 1965), según la expresión:

$$n = (\text{humedad Sat} - 0,2 [\text{limo} + \text{arena}]) / (\text{arcilla} + 3 [\text{materia orgánica}])$$

Predice si un suelo puede ser pastoreado por el ganado o puede soportar otras cargas. Para predecir el grado de subsidencia que puede ocurrir después del drenaje, Soil Survey Laboratory (1996) muestra la relación entre el porcentaje de agua en el suelo bajo condiciones de campo y sus porcentajes de arcilla inorgánica y humus. El índice de plasticidad indica el rango de humedad en el que el material tiene un comportamiento plástico. El índice líquido indica la proximidad del suelo natural al límite líquido. El índice de consistencia es útil en el estudio del comportamiento en campo (y laboratorio) de suelos de granos finos (limos y arcillas).

- 4) Test de Emerson de coherencia de agregados al agua. Clasifica los agregados del suelo en ocho clases de estabilidad, y se basa en el fraccionamiento, hinchamiento o dispersión de los agregados del suelo cuando se introducen en agua (EMERSON, 1967). La principal ventaja de este método es que diferencia los dos procesos básicos de la destrucción de los agregados por el agua (el fraccionamiento y la dispersión), y permite evaluar indirectamente el efecto dispersante debido al trabajo realizado sobre el suelo (MATAIX-SOLERA y cols., 2010). Su principal desventaja es que divide los suelos en clases muy amplias, ya que dentro de cada clase pueden presentarse grandes diferencias en la estabilidad (GREENLAND y cols., 1975).
- 5) Sensibilidad a la meteorización física mediante ciclos de congelación-descongelación y de humectación-secado (fig. 3).

Con el material parental se llevan a cabo ciclos de congelación-descongelación y ciclos de humectación-secado, de forma similar a PARDINI y cols. (1996). Previa realización de los ciclos hielo-deshielo (F-T) y humectante-secado (W-D), las muestras se equilibran en una capa arena a capacidad de campo (tensión de agua de 33 kPa). Las muestras para los ciclos de F-T se congelan a $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante tres días



Fig. 3. Detalle del aspecto de la superficie del suelo de la parcela con grietas superficiales en las estaciones secas (invierno, verano).

y luego se dejan descongelar a temperatura ambiente. El ciclo completo de F-T dura seis días. Las muestras para los ciclos de W-D se mantienen durante tres días a la capacidad de campo y después se dejan secar a temperatura ambiente. Cada ciclo de W-D dura quince días. Se realizan un total de tres ciclos F-T y dos ciclos W-D.

RESULTADOS

A continuación se presentan desglosados los resultados obtenidos.

a) Coeficiente de extensibilidad lineal (COLE)

Los valores del COLE se encuentran comprendidos entre los 0,018 centímetros centímetros⁻¹ (horizonte G4-2C1, 80 centímetros de profundidad), con expansibilidad baja y cambio de volumen menor al 10%; y los 0,095 centímetros centímetros⁻¹ (horizonte G2-3Abk2, 180 centímetros de profundidad),

con expansibilidad muy alta y cambio de volumen mayor del 30%. El valor medio, teniendo en cuenta todos los horizontes, es de 0,046 centímetros centímetros⁻¹ (expansibilidad media y cambio de volumen entre el 10 y el 20%).

En la tabla II se muestra la clase de extensibilidad para cada horizonte y cada perfil. No se observa una relación directa entre el COLE y su situación.

Tabla II. Tipo de cambio de volumen en los perfiles y horizontes.

COLE	G0	G1	G2	G3	G4
1	Baja	Alta	Media	Media	Media
2	Media	Media	Media	Media	Media
3	Baja	Media	Media	Media	Baja
4		Media	Alta	Baja	Baja
5		Media	Alta	Baja	Media
6		Media	Muy alta	Media	Media
7		Media	Media	Alta	Alta
8			Media		
9			Media		

En la figura 4 se constata que la mayor parte de los horizontes estudiados tienen una expansibilidad media (64%); el resto se reparte entre las clases baja (18%), alta (15%) y muy alta (3%).

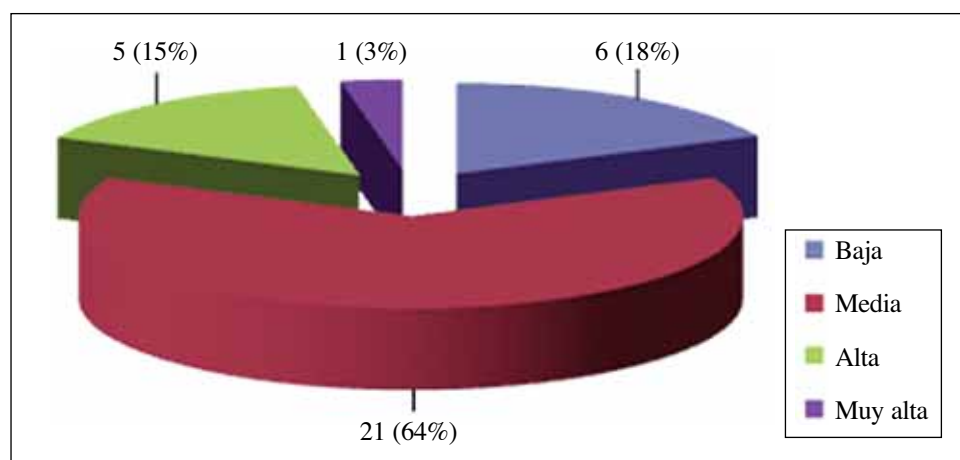


Fig. 4. Tipo de expansibilidad en los horizontes. Se indica el número de muestras empleadas y, entre paréntesis, el porcentaje respecto al total.

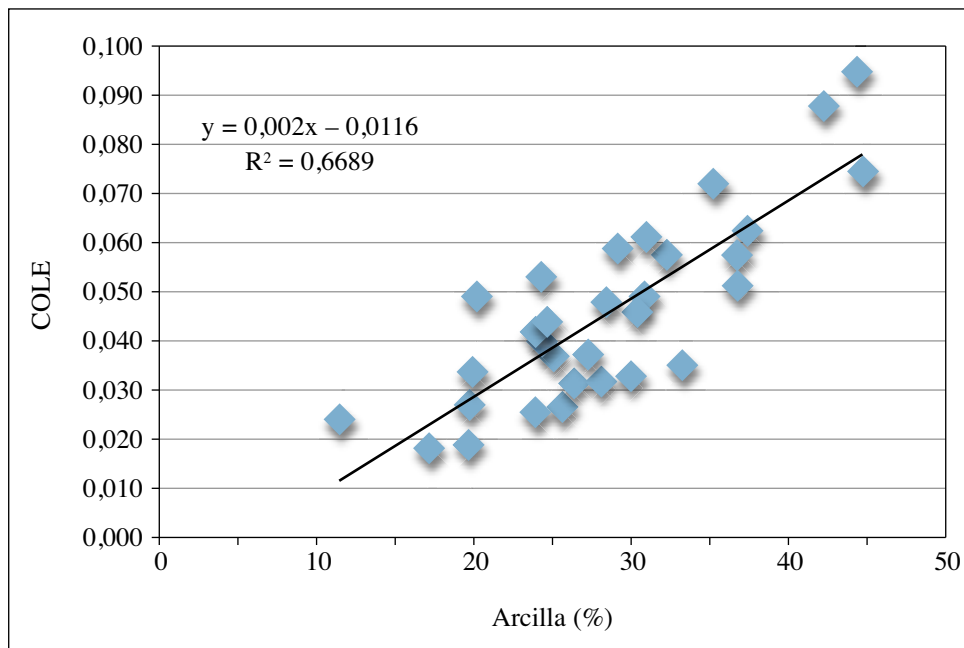


Fig. 5. Relación entre el COLE y el contenido en arcilla de los horizontes.

La figura 5 muestra la relación lineal entre los valores del COLE y el contenido de arcillas de los perfiles, con un coeficiente de regresión del 67%.

b) Límites de Atterberg: límite líquido (método de Casagrande)

El valor medio del límite líquido, teniendo en cuenta todos los horizontes, es del 27,7% en el rango del 19,5% (horizonte G2-4Cg, 240 centímetros de profundidad) al 36,4% (horizonte G2-3Abk2, 180 centímetros de profundidad).

El límite líquido en el perfil G0 disminuye con la profundidad; en el perfil G1, se mantiene constante con un valor del 30%; en el perfil G3, disminuye con la profundidad, salvo en el último horizonte, a 200 centímetros, en que está su valor máximo. Al perfil G4, en el horizonte más profundo, le ocurre algo similar que al G3; sin embargo, su evolución en profundidad disminuye y aumenta progresivamente. El perfil G2 se comporta de forma singular, ya que no tiene un patrón definido de evolución.

En el perfil G0, el mayor valor se encuentra en el horizonte superficial Ah; sin embargo, para el perfil G1 su valor máximo se encuentra a una pro-

fundidad de 105 centímetros. En los perfiles G3 y G4, su máximo valor se encuentra a partir de los 200 centímetros de profundidad.

En la mayor parte de los horizontes estudiados, la plasticidad de las arcillas es baja (79%); el resto tienen un carácter moderado (21%), estando concentradas en los horizontes G3 (3) y G2 (2) de las siete (7).

c) Límites de Atterberg: límite plástico

El valor medio del límite plástico de todos los horizontes es del 21,6% en el rango del 16,3% (horizonte G4-2C2, 120 centímetros de profundidad) al 27% (horizonte G3-Cr, > 200 centímetros de profundidad).

En el perfil G0, el límite plástico disminuye con la profundidad, con un cambio apreciable del horizonte superficial Ah con respecto al resto del perfil. En el perfil G1, hay un aumento progresivo hasta una profundidad de 105 centímetros (horizonte Ck2); y a partir de 140 centímetros se mantiene constante con un valor del 23%. En el perfil G2, también hay un aumento progresivo hasta los 130 centímetros (horizonte 3Abk1), y el resto del perfil hasta los 250 centímetros cambia súbitamente con forma cóncava-convexa. En el perfil G3, se dan los mayores valores de todos los horizontes, disminuyendo progresivamente en profundidad hasta los 90 centímetros (horizonte ABg1) y luego drásticamente hasta los 200 centímetros (horizonte CBr), y a partir de los 200 centímetros (horizonte Cr) aumenta de forma que es el mayor valor de todos los horizontes; el perfil G4 tiene un patrón cóncavo-convexo donde coinciden los valores a una profundidad de 15 centímetros (horizonte Ap1) y 200 centímetros (horizonte 4Cg).

En la tabla III se muestran los resultados del coeficiente de extensibilidad lineal (COLE), así como los límites de Atterberg, para cada uno de los horizontes estudiados.

d) Test de Emerson de coherencia al agua

El test de coherencia al agua (test de Emerson) muestra cómo la mayoría de los horizontes se desmenuzan (fig. 6), con una dispersión parcial (Clase 2), con un 58%, o bien con una dispersión total (Clase 1), con un 39%. Solo una muestra de las 33 (que supone un 3%) no ha evidenciado dispersión, tratándose de una capa profunda (2C2 del perfil G4).

Tabla III. Resultados del COLE y de los límites de Atterberg para los horizontes estudiados.

<i>Perfil</i>	<i>Horizonte</i>	<i>Profundidad (cm)</i>	<i>COLE</i>	<i>Límite líquido (%)</i>	<i>Límite plástico (%)</i>
G0	Ah	15	0,025	28,815	23,8
	AC	30	0,044	27,932	20,7
	C	70	0,019	26,412	20,8
G1	Ap1	15	0,061	29,017	21,9
	Ap2	50	0,057	29,586	22,8
	Ck1	70	0,048	29,273	23,8
	Ck2	105	0,049	30,903	24,3
	C2	140	0,046	28,667	22,5
	C3	200	0,047	29,858	23,2
	C4	> 200	0,033	29,186	22,9
G2	Ap1	15	0,037	27,808	19,6
	Ap2	50	0,039	23,198	19,1
	C	70	0,042	26,190	20,5
	2Ab1	90	0,072	32,512	21,3
	3Abk1	130	0,088	29,121	22,9
	3Abk2	180	0,095	36,355	27,1
	4ACkg	200	0,059	21,830	18,2
	4Cg	240	0,033	19,460	18,4
5C	250	0,035	28,556	21,9	
G3	Ap1	15	0,057	30,521	25,5
	Ap2	50	0,051	31,063	26,7
	ABg1	90	0,037	29,011	25,1
	Bg2	130	0,027	28,733	20,4
	BCg	160	0,026	25,901	19,6
	CBr	200	0,031	25,754	19,7
	Cr	> 200	0,075	31,690	27,0
G4	Ap1	15	0,032	26,707	22,2
	Ap2	50	0,031	26,982	21,3
	2C1	80	0,018	21,154	18,1
	2C2	120	0,024	21,222	16,3
	3Cg1	150	0,049	24,682	18,4
	3Cg2	170	0,053	23,731	19,4
	4Cg	200	0,062	32,804	22,0

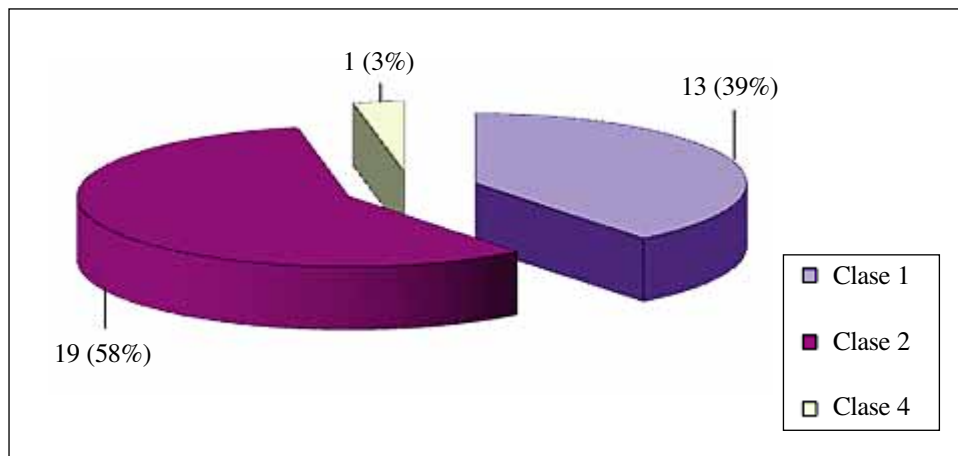


Fig. 6. Test de Emerson. Se indica el número de horizontes y, entre paréntesis, el porcentaje de cada clase de coherencia al agua.

e) Sensibilidad a la meteorización física: ciclos de congelación-descongelación y ciclos de humectación-secado

No se produce fragmentación si no se encuentra humectada (disgregación en seco). Sin embargo, con un solo ciclo de humectación-secado, la mayor parte de los bloques de margas se fragmentan (11 de 18). Si a ello añadimos tres ciclos sucesivos de congelación-descongelación, cuatro de los siete restantes se fragmentan. La rotura dio lugar a una amplia gama de tamaños (del 3 al 30% peso inicial) y número (desde 2 hasta 23 piezas) (figs. 7a y b).



Fig. 7a. Bloque inalterado (izquierda) y resultado de su fragmentación (derecha) tras un ciclo de humectación-secado.

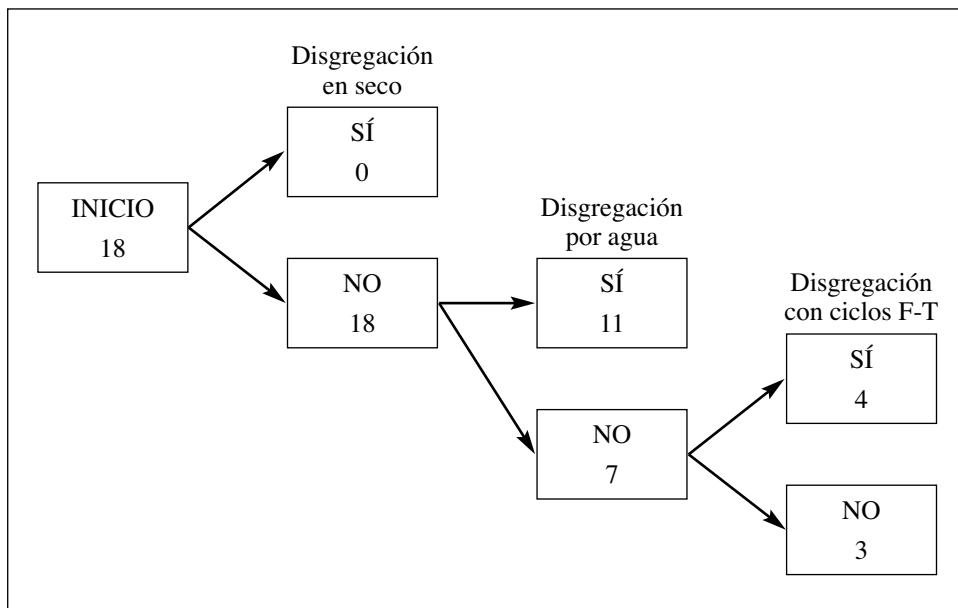


Fig. 7b. Número de bloques inalterados disgregados en seco, disgregados con ciclos hielo-deshielo (F-T) y ciclos humectante-secado (W-D) de manera sucesiva.

f) Determinación de índices

El *índice de subsidencia* tiene un valor medio de 1,1 en un rango de 0,8 a 1,4. Los mayores valores se dan en el perfil G1 a partir de 105 centímetros (horizonte Ck2), disminuyendo hasta una profundidad de 140 centímetros (horizonte C2) y aumentando y manteniendo el máximo valor desde los 200 centímetros de profundidad (horizontes C3 y C4). Los demás perfiles mantienen aproximadamente el mismo patrón hasta una profundidad de 130 a 160 centímetros. A partir de esa profundidad, los perfiles G1 y G2 aumentan progresivamente hasta sus máximos valores, y los perfiles G3 y G4 van disminuyendo su valor. Todos los suelos de los horizontes estudiados fluyen, ya que el índice de subsidencia se encuentra por encima de 0,7. Fluyen fácilmente el 55% de los horizontes, con dificultad el 42% y muy fácilmente el 3%. Salvo en el perfil G0, en el que todos los horizontes fluyen por igual, en los restantes lo hacen en horizontes a partir de los 70 (perfil G1), 90 (perfil G3), 120 (perfil G4) y 240 centímetros de profundidad (perfil G2) (fig. 8).

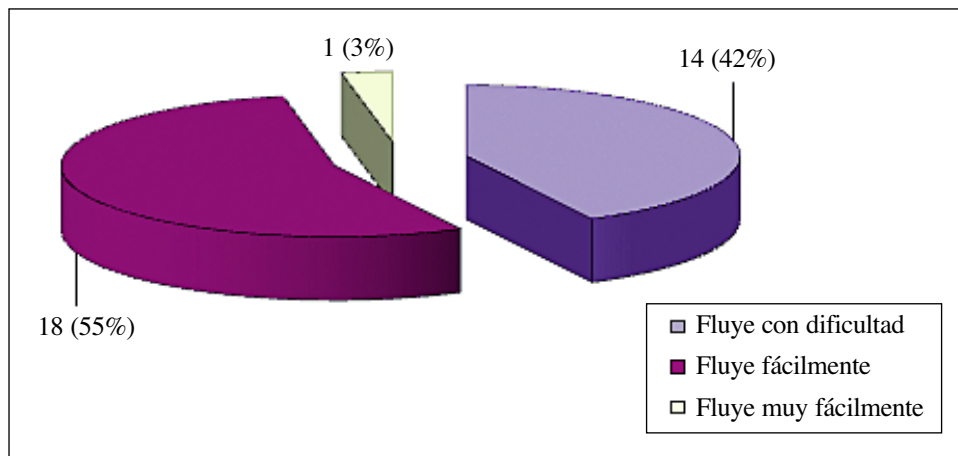


Fig. 8. Índice de subsidencia (n) de las 33 muestras de suelos.
Entre paréntesis, el porcentaje respecto al total.

El valor medio del índice de plasticidad de todos los horizontes es del 5,9% en el rango del 1% (horizonte G2-4Cg, 240 centímetros de profundidad) al 11,2% (horizonte G2-2Ab1, 90 centímetros de profundidad). Este índice es muy variable en profundidad, destacando en este sentido el perfil G4, donde el mayor valor se encuentra en el horizonte 4Cg, a 200 centímetros de profundidad; y también es en el G2 donde se encuentra el mayor y menor valor de todos los horizontes estudiados. Los perfiles G1 y G3 tienen valores más estables; sobre todo el perfil G1, que mantiene el mismo valor en profundidad, salvo el horizonte superficial (Ap1), que es el mayor de su perfil. En el G3, el mayor valor se encuentra a 130 centímetros (horizonte Bg2). En el perfil G0, este valor se halla a 30 centímetros (horizonte AC). El valor medio teniendo en cuenta todos los horizontes es del 5,9%.

Los resultados del índice líquido obtenidos con valores negativos indican que el suelo tiene un comportamiento como sólido frágil (semisólido o sólido), porque su humedad natural es inferior al límite plástico. Si los valores estuvieran entre 0 y 1, tendría un comportamiento como sólido plástico e indicaría que el suelo tendría la humedad natural entre el límite plástico y el líquido. Finalmente, si los valores fueran mayores a la unidad, tendría un comportamiento como fluido viscoso y significaría que el suelo tendría la humedad natural superior al límite líquido. Como este índice muestra la proximidad de la humedad natural del suelo al límite líquido, el horizonte más

próximo a este límite se localiza en el perfil G2 (horizonte 2Ab1, 90 centímetros de profundidad). También el más alejado de dicho límite se sitúa en el perfil G2 (horizonte 4Cg, 240 centímetros de profundidad). En el horizonte G1, se mantiene un valor constante a lo largo de todo el perfil, hecho que no ocurre en el resto. En los horizontes superficiales todos los perfiles tienen valores próximos, excepto en el perfil G1 y en el perfil G2.

Los resultados del índice de consistencia indican un comportamiento idéntico al índice líquido. En el perfil G2, se encuentran los horizontes con el mayor y el menor valor (coincidentes con el índice anterior). También su comportamiento a lo largo de la toposecuencia y de la profundidad. Los coeficientes de correlación son muy bajos ($R < 0,5$), por lo que esta propiedad, como la anterior, es poco significativa respecto a las demás.

g) Carta de Casagrande

La carta de Casagrande sirve para identificar los suelos arcillosos y limosos a partir de relacionar el límite líquido con el índice de plasticidad.

Sirve de base para la clasificación de suelos basada en las características del tamaño de las partículas. El Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (USC) designa los suelos de acuerdo con su textura y su plasticidad. Los grupos de suelos se basan en los porcentajes de intervalos seleccionados de tamaño de partículas, la configuración de la curva de frecuencias

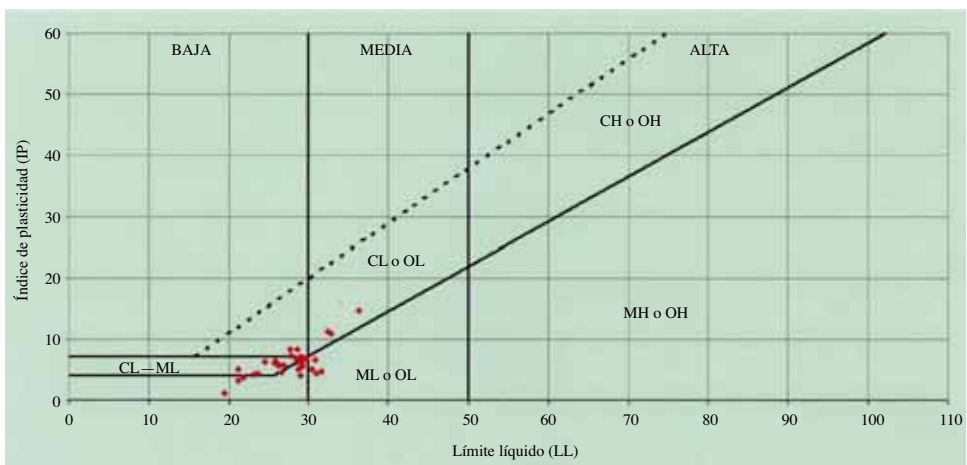


Fig. 9. Resultados de la carta de Casagrande para los 33 horizontes estudiados.

Tabla iv. Carta de Casagrande. Variables utilizadas y resultados obtenidos.

<i>Código</i>	<i>Perfil</i>	<i>Horizonte</i>	<i>IP (%)</i>	<i>LL (%)</i>	<i>Clasificación (plasticidad) USC</i>
1	G0	Ah	5,0	28,8	Fuera de rango (baja)
2	G0	AC	7,3	27,9	CL o OL (baja)
3	G0	C	5,6	26,4	CL-ML (baja)
4	G1	Ap1	7,1	29,0	CL o OL (baja)
5	G1	Ap2	6,8	29,6	Fuera de rango (baja)
6	G1	Ck1	5,5	29,3	Fuera de rango (baja)
7	G1	Ck2	6,6	30,9	ML o OL (media)
8	G1	C2	6,2	28,7	Fuera de rango (baja)
9	G1	C3	6,7	29,9	Fuera de rango (baja)
10	G1	C4	6,3	29,2	Fuera de rango (baja)
11	G2	Ap1	8,2	27,8	CL o OL (baja)
12	G2	Ap2	4,1	23,2	CL-ML (baja)
13	G2	C	5,7	26,2	CL-ML (baja)
14	G2	2Ab1	11,2	32,5	CL o OL (media)
15	G2	3Abk1	6,2	29,1	Fuera de rango (baja)
16	G2	3Abk2	14,6	36,4	CL o OL (media)
17	G2	4ACkg	3,6	21,8	Fuera de rango (baja)
18	G2	4Cg	1,0	19,5	Fuera de rango (baja)
19	G2	5C	6,6	28,6	CL-ML (baja)
20	G3	Ap1	5,1	30,5	ML o OL (media)
21	G3	Ap2	4,3	31,1	ML o OL (media)
22	G3	ABg1	3,9	29,0	Fuera de rango (baja)
23	G3	Bg2	8,3	28,7	CL o OL (baja)
24	G3	BCg	6,3	25,9	CL-ML (baja)
25	G3	CBr	6,1	25,8	CL-ML (baja)
26	G3	Cr	4,6	31,7	ML o OL (media)
27	G4	Ap1	4,5	26,7	Fuera de rango (baja)
28	G4	Ap2	5,6	27,0	CL-ML (baja)
29	G4	2C1	3,1	21,2	Fuera de rango (baja)
30	G4	2C2	4,9	21,2	CL-ML (baja)
31	G4	3Cg1	6,2	24,7	CL-ML (baja)
32	G4	3Cg2	4,3	23,7	CL-ML (baja)
33	G4	4Cg	10,8	32,8	CL o OL (media)

de partículas según su tamaño y las características de plasticidad-compresibilidad (FAO, 2015).

En la figura 9 se muestran los resultados para los horizontes estudiados. Se acompaña también la tabla IV con las propiedades utilizadas y el resultado obtenido en la figura 9.

La mayor parte de los horizontes estudiados están fuera de rango, con plasticidad baja (36%); el 30% de los horizontes son arcillo-limosos, con baja plasticidad; el 12% son limos con plasticidad media; y el resto son arcillas o limos con plasticidad baja (12%), o bien plasticidad media (9%).

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los suelos con potencial alto o muy alto de expansión-contracción (COLE) suelen tener alto contenido de arcilla y valores elevados de los límites líquido (LL) y plástico (LP), según diversos autores (AHMAD y MERMUT, 1996; THOMAS y cols., 2000), lo cual se ha evidenciado en este estudio.

La mayor evaporación que se produce en verano puede favorecer la aparición de grietas en el horizonte superficial en suelos limosos y no cohesivos. Las grietas se forman por la contracción del suelo al secarse en verano, lo que supone un movimiento de agua en *by-pass*, mojándose los horizontes más profundos sin apenas humectar los superficiales. Sin embargo, en invierno, sin grietas, el agua puede quedar en la superficie del suelo durante largos periodos, lo que provoca problemas de aireación del mismo (SOLE y cols., 1992) y obliga a los agricultores a construir aguaderas.

El contenido de humedad identificado con los límites de Atterberg (W_L , W_p) y su diferente presión (saturación, FC, PWP) se relacionan positiva y significativamente ($p < 0,001$) con el contenido de arcilla y, en menor medida, con el contenido de sedimento fino. Del mismo modo, el contenido de arcilla se correlaciona con el COLE ($r = 0,82$) y el índice de plasticidad ($r = 0,54$).

Las correlaciones entre extensibilidad lineal, plasticidad y contenido en arcilla también fueron nombradas por DE JONG y cols. (1992) en suelos *chernozem* de Saskatchewan (Canadá). El índice de plasticidad, que aquí va del 4 al 15% en los suelos analizados, asume valores relativamente bajos

para la expansiva de los suelos. THOMAS y cols. (2000) midieron los valores IP del 17 al 46% en suelos de la cuenca Culpeper (Virginia).

Los datos analizados revelan una correlación negativa entre el contenido de carbonato (principalmente calcita) y el COLE. RIMMER y GREENLAND (1976) obtuvieron resultados similares como evidencia de que se reduce el carbono inorgánico con la contracción del suelo por dilución y/o por agregados de unión juntos.

El índice de subsidencia (n) oscila entre 0,8 y 1,4, y por lo general aumenta con la profundidad del suelo. El riesgo de hundimiento se incrementa para los valores $n > 0,7$ (PORTA y LÓPEZ-ACEVEDO, 2005), en función de las proporciones de limo. El límite líquido (WL) suele ser inferior al 30% en todos los horizontes del suelo. En la capa freática de los horizontes del estudio podría llegar fácilmente a este umbral, proporcionando un mecanismo para solifluxión frecuente, similar a la proporcionada por resistencia del lodo, que a menudo actúa como un subsuelo de deslizamiento de ladera abajo en suelos inmaduros (SOLE y cols., 1992).

THOMAS y cols. (2000) encontraron valores W_L que oscilaban entre el 49 y el 63% en unidades de mapa de suelo expansivo de la cuenca de Culpeper (Virginia). Ellos comprobaron que el potencial de expansión-contracción estaba fuertemente relacionado con W_L , así como con la cantidad y el tipo de arcillas (hinchazón 2 : 1 minerales de arcilla, CEC). Límite líquido bajo, baja estabilidad de los agregados y altos valores de subsidencia permiten que los horizontes superficiales se deslicen cuesta abajo. La presencia de suelos enterrados, las numerosas discontinuidades litológicas y el poco grado de la evolución del suelo sugieren que los eventos erosivos son recientes y frecuentes. Diferentes estudios, resumidos por GARCÍA-RUIZ (2010), proponen que la erosión del suelo ya se estaba produciendo en el centro de los Pirineos durante la Edad del Bronce, intensificándose durante la Edad Media y el mínimo de Maunder de la Pequeña Edad del Hielo, cuando la influencia de uso de la tierra y los cambios de cobertura de plantas alcanzaron el máximo de los factores geoecológicos.

El papel de las heladas (gelifracción) se ha observado en margas del Eoceno, pobres en esmectitas, por NADAL-ROMERO y cols. (2007). Estos investigadores encontraron que la erosión física de margas en el Pirineo

central se intensificó a partir de mediados del otoño hasta el final del invierno, cuando la humedad es elevada y se inician los ciclos de congelación y descongelación. El transporte de sedimentos y la erosión se intensifican desde la primavera al otoño cuando la fuerza de la lluvia, debido a las tormentas de verano, elimina los sedimentos. La observación de áreas vecinas también ha demostrado que las margas azuladas del Eoceno son rápidamente convertidas en cárcavas erosionables, produciendo escorrentía y altas tasas de erosión (por ejemplo, REGÜÉS y cols., 2000; GARCÍA-RUIZ y cols., 2008; VERICAT y cols., 2014). Estos factores impiden el desarrollo del suelo y facilitan la sedimentación en los valles. Con humedad, las margas esmeclíticas del Cretácico-Paleoceno tardío (PARDINI y cols., 1996) varían de volumen por la acción de las heladas y los ciclos de humectación-secado producen grandes grietas y fisuras.

Coefficiente de correlación (R)

Se constata y muestra en la tabla v que el COLE se correlaciona de forma significativa ($p < 0,01$) y positiva con el contenido en arcillas, la humedad seca al aire (H), el punto de marchitez permanente (PMP), y con la capacidad de campo (CC). Lo hace de forma significativa ($p < 0,01$) y negativa con el factor K de la ecuación de pérdida de suelo (K-USLE), con el índice del riesgo de formación de costra (IRFC), con el limo grueso (LG), con el contenido en carbonatos (CO_3) y con el pH potencial (pH p).

El límite líquido se correlaciona de forma significativa ($p < 0,01$) y positiva con el contenido en arcillas, la humedad seca al aire (H), el punto de marchitez permanente (PMP) y la capacidad de campo (CC), la humedad de saturación (HS) y el COLE. Lo hace de forma significativa ($p < 0,01$) y negativa con la arena gruesa (AG), la arena fina (AF) y el limo grueso (LG).

El índice de subsidencia (n) se correlaciona de forma significativa ($p < 0,01$) y positiva con el contenido en carbonatos (CO_3Ca), el limo fino (LF), el IRFC, el K-USLE y la humedad de saturación (HS). Lo hace de forma significativa ($p < 0,01$) y negativa con el contenido de materia orgánica (MO) y el COLE.

El límite plástico se correlaciona de forma significativa ($p < 0,01$) y positiva con el limo grueso (LG), la arcilla, el PMP, el CC, la humedad de saturación (HS) y el límite líquido. Lo hace de forma significativa ($p < 0,01$) y negativa con el pH actual (pH a), la arena gruesa (AG), la arena fina (AF) y el limo grueso (LG).

El índice de plasticidad se correlaciona de forma significativa ($p < 0,01$) y positiva con el límite líquido.

El índice líquido (IL) se correlaciona de forma significativa ($p < 0,01$) y positiva con el límite líquido y el índice de plasticidad.

El índice de consistencia (IC) se correlaciona de forma significativa ($p < 0,01$) y negativa con el límite líquido, el índice de plasticidad y el índice líquido.

Clasificación de suelos

El objeto de este apartado es identificar si los suelos estudiados presentan horizontes vérticos o protovérticos, según la WRB (IUSS, 2014).

Los horizontes vérticos tienen como criterios de diagnóstico:

- Que contengan un 30% o más de arcillas en todo su espesor.
- Una o ambas propiedades:
 - Que tengan agregados estructurales en forma de cuña con un eje longitudinal inclinado entre 10° y 60° respecto a la horizontal.
 - Que tengan sus caras pulidas y brillantes (*slickensides*).
- Presencia de grietas de contracción-dilatación que en verano tengan 0,5 centímetros de ancho o más.
- Un espesor de 25 centímetros o más.

Como característica adicional, y como medida del potencial de agrietamiento, se considera que el COLE debe ser mayor a 0,06 centímetros centímetros⁻¹.

Por su parte, los horizontes protovérticos tienen como criterios de diagnóstico:

- Que contengan un 30% o más de arcillas en todo su espesor.

- Una o varias propiedades:
 - Que tengan agregados en forma de cuña con un eje longitudinal inclinado entre 10° y 60° respecto a la horizontal.
 - Que tengan sus caras pulidas y brillantes (*slickensides*).
 - Presencia de grietas de contracción-dilatación que en verano tengan 0,5 centímetros de ancho o más.
 - COLE de 0,06 o más.
- Un espesor de 15 centímetros o más.

Como característica adicional, y como medida del potencial de agrietamiento, se considera que el COLE debe ser mayor a 0,06 centímetros centímetros⁻¹.

Estos últimos criterios los cumplen algunos de los horizontes de los perfiles G1, G2 y G3, de los cinco del estudio. Por eso se les puede añadir el calificativo de *protovértico* para completar el nombre de la unidad de suelos y evidenciar que se trata de un intergrado hacia los Vertisoles. Así, el perfil G0 se clasifica, según la WRB, como Regosol calcárico límico, el perfil G1 como Calcisol háplico límico protovértico, el perfil G2 como Regosol calcárico límico (sobre un suelo enterrado), como Regosol calcárico límico protovértico el perfil G3, y el G4 como Regosol calcárico límico.

Es llamativa la ausencia de esmectitas a favor de las arcillas micáceas o ilitas (60%), acompañadas de calcita (20%) y cuarzo (15%). Los suelos en fondos se empobrecen en calcita a favor del cuarzo (BADÍA y cols., 2015). Su capacidad de expansión-contracción según los ciclos de humedecimiento y secado, puesta en evidencia con la aparición de grietas en horizontes superficiales, no se relacionan, por tanto, con la presencia de arcillas expansibles como las esmectitas y vermiculitas, ausentes o escasas en estos suelos. Esta composición es similar a la descrita por NADAL-ROMERO y cols. (2007) en margas eocenas (n = 8) con diferente grado de alteración en la cuenca de Araguás. Por ello, y por la ausencia de agregados en cuña, los suelos no se clasifican como Vertisoles, como se había indicado (IBARRA, 2004; IGN, 2006), aunque están muy próximos a ellos (BADÍA y cols., 2015), como habían advertido GUERRA y MONTURIOL (1970), que los denominaron *Vertisoles topomorfos*.

CONCLUSIONES

Los suelos desarrollados sobre margas eocenas se caracterizan por tener mayoritariamente una expansibilidad (COLE) media, con cambios de volumen entre el 10 y el 20%. El COLE se correlaciona de forma positiva con la cantidad de arcilla y la retención de agua en el suelo en sus distintas tensiones y, de forma negativa con el contenido en carbonatos. Desde el punto de vista taxonómico, los suelos no cumplen los criterios de diagnóstico de horizonte vértico (propio de Vertisoles), pero sí de protovértico, en tres de los cinco perfiles estudiados.

En cuanto a los límites de Atterberg, el límite líquido (LL) indica una baja plasticidad de sus arcillas. El LL se correlaciona de forma positiva con el contenido en arcillas y de forma negativa con el contenido en arena fina. El límite plástico (LP) se correlaciona de forma significativa y positiva con el contenido de humedad a saturación del suelo y de forma negativa con el contenido de arena fina.

El índice de subsidencia es entre moderado y alto, lo que indica que todas las muestras de suelos tienen cierta facilidad para fluir. De acuerdo con el índice de plasticidad (IP), se puede indicar que la gran mayoría de los horizontes caracterizados son débilmente plásticos y el resto son medianamente plásticos. El índice líquido adquiere un valor negativo en todas las muestras, lo que indica que los suelos tienen un comportamiento como sólido frágil.

Los agregados del suelo se dispersan parcial o totalmente al sumergirlos en agua (test de Emerson), lo que da una idea de su baja estabilidad estructural.

Respecto a los procesos de congelación-descongelación y humectación-secado de bloques inalterados de margas (material parental de los suelos), se constata cómo un único ciclo de humectación-secado produce la fractura del 61% de los mismos. Si a esa humectación le suceden tres ciclos de congelación-descongelación se produce la fragmentación de la mayoría de los bloques (83%). La congelación sin humedad no genera ninguna fractura. Todos estos aspectos ponen en evidencia cómo las margas eocenas presentan una alta sensibilidad frente a la meteorización física, lo cual tiene una alta repercusión tanto en ingeniería civil como en el comportamiento agronómico de los suelos desarrollados sobre las mismas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la ayuda y la colaboración de la doctora Clara Martí Dalmau, por la ayuda prestada en las diversas fases del estudio. A Asunción Callizo Salvo y Ana Belén Aguado Operé, por su amabilidad y atención durante el análisis de las muestras en el laboratorio. A Joaquín Lanuza Meavilla y Tomás Salinas Ferrer, por la utilización de las herramientas del invernadero. A José Antonio Manso Alonso, por la colaboración en la búsqueda de posibles soluciones para uno de los análisis realizados. También al doctor José Antonio Cuchí Oterino, por sus explicaciones de geología, paisaje y cultura durante este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMAD, N., y A. MERMUT (eds.) (1996). *Vertisols and Technologies for their Management*. Elsevier (Developments in Soil Science, 24). Ámsterdam.
- BADÍA, D., D. ORÚS, J. R. DOZ, J. CASANOVA, R. M. POCH y M. T. GARCÍA-GONZÁLEZ (2015). Vertic features in a soil catena developed on Eocene marls in the Inner Depression of the Central Spanish Pyrenees. *Catena*, 129: 86-94. www.doi: 10.1016/j.catena.2015.03.006
- BEGUERÍA, S. (2005). *Erosión y fuentes de sedimento en la cuenca del embalse de Yesa (Pirineo occidental)*. Ensayo de una metodología basada en teledetección y análisis SIG. Instituto Pirenaico de Ecología. Zaragoza. 158 pp.
- CASAGRANDE, A. (1932). Research on the Atterberg limits of soils. *Public Roads*, 13: 121-130, 136.
- CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO (CHE) (2007). *Plan Hidrológico del río Gállego*. [Borrador: Documentación previa para su análisis]. Versión V. 2 de diciembre de 2007. Programa AGUA. Ministerio de Medio Ambiente del Gobierno de España y Departamento de Medio Ambiente del Gobierno de Aragón. 276 pp.
- CREUS, J., y M. GIL (2001). Clima. En *El medio físico y su peligrosidad en un sector del Pirineo central*: 39-41. Instituto Geológico y Minero de España. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Madrid.
- DE JONG, E., L. M. JOZAK y H. B. STONEHOUSE (1992). Comparison of shrink-swell indices of some Saskatchewan soils and their relationships to standard soil characteristics. *Can. J. Soil Sci.*, 72: 429-439.
- DE SANTIS, F., M. L. GIANNOSSI, L. MEDICI, V. SUMMA y F. TATEO (2010). Impact of physico-chemical soil properties on erosion features in the Aliano area (Southern Italy). *Catena*, 81 (2): 172-181.
- EMERSON, W. (1967). A classification of soil aggregates based on their coherence in water. *Soil Research.*, 5 (1): 47-57.

- FAULKNER, H., R. ALEXANDER y B. R. WILSON (2003). Changes to the dispersive characteristics of soils along an evolutionary slope sequence in the Vera badlands, southeast Spain: implications for site stabilisation. *Catena*, 50 (2): 243-254.
- GALLART, F., M. MARIGNANI, N. PÉREZ-GALLEGO, E. SANTI y S. MACCHERINI (2013). Thirty years of studies on badlands, from physical to vegetational approaches. A succinct review. *Catena*, 106: 4-11.
- GARCÍA-RUIZ, J. M. (2010). The effects of land uses on soil erosion in Spain: A review. *Catena*, 81: 1-11.
- GARCÍA-RUIZ, J. M., D. REGÜÉS, B. ALVERA, N. LANA-RENAULT, P. SERRANO-MUELA, E. NADAL-ROMERO y J. ARNÁEZ (2008). Flood generation and sediment transport in experimental catchments affected by land use changes in the central Pyrenees. *Journal of Hydrology*, 356 (1): 245-260.
- GREENLAND, D. J., D. RIMMER y D. PAYNE (1975). Determination of the structural stability class of English and Welsh soils using a water coherence test. *Journal of Soil Science*, 26: 294-303.
- GUERRA, A., y F. MONTURIOL (1970). *Mapa de suelos de las provincias de Zaragoza, Huesca y Logroño*. CSIC. Madrid.
- IBARRA, P. (2004). La diversidad edáfica del territorio aragonés. En J. L. Peña, L. A. Longares y M. Sánchez (eds.), *Geografía física de Aragón*: 41-53. IFC / Universidad de Zaragoza. Zaragoza.
- IGN (2006). *Atlas Nacional de España: geología, geomorfología y edafología*. Instituto Geográfico Nacional. Madrid.
- IUSS WORKING GROUP WRB (2014). *World Reference Base for Soil Resources 2014. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps*. FAO (World Soil Resource Reports, 106). Rome. 181 pp.
- KASANIN-GRUBIN, M. (2013). Clay mineralogy as a crucial factor in badland hillslope processes. *Catena*, 106: 54-67.
- MATAIX-SOLERA, J., E. BENITO, V. ANDREU, A. CERDÀ, J. LLOVET, X. ÚBEDA, CL. MARTÍ, E. VARELA, E. GIMENO, V. ARCENEGUI, J. L. RUBIO, J. CAMPO, F. GARCÍA-ORENES y D. BADÍA (2010). ¿Cómo estudiar la estabilidad de agregados en suelos afectados por incendios? Métodos e interpretación de resultados. En A. Cerdà y A. Jordán López (coords.), *Actualización en métodos y técnicas para el estudio de los suelos afectados por incendios forestales*: 109-143. Universitat de València. Valencia.
- MONTES, M. J. (2009). *Estratigrafía del Eoceno-Oligoceno de la cuenca de Jaca*. IEA (Colección de Estudios Altoaragoneses, 59). Huesca. 355 pp.
- NADAL-ROMERO, E. (2011). *Las áreas de cárcavas (badlands) como fuente de sedimento en cuencas de montaña: procesos de meteorización, erosión y transporte en margas del Pirineo central*. Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón. Departamento de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente del Gobierno de Aragón (Serie Investigación). Zaragoza. 377 pp.

- NADAL-ROMERO, E., D. REGÜÉS, C. MARTÍ-BONO y P. SERRANO-MUELA (2007). Badland dynamics in the Central Pyrenees: Temporal and spatial patterns of weathering processes. *Earth Surf. Process. Landforms*, 32: 888-904.
- PARDINI, G. (2003). Fractal scaling of surface roughness in artificially weathered smectite-rich soil regoliths. *Geoderma*, 117 (1): 157-167.
- PARDINI, G., G. V. GUIDI, R. PINI, D. REGÜÉS y F. GALLART (1996). Structure and porosity of smectitic mudrocks as affected by experimental wetting-drying cycles and freezing-thawing cycles. *Catena*, 27 (3-4): 149-165.
- PONS, L. J., e I. S. ZONNEVELD (1965). *Soil Ripening and Soil Classification. Initial Soil Formation in Alluvial Deposits and a Classification of the Resulting Soils*. International Institute Land Reclamation and Impro (ILRI, 13). Wageningen.
- PORTA, J., y M. LÓPEZ-ACEVEDO (2005). *Agenda de campo de suelos: información de suelos para la agricultura y el medio ambiente*. Mundi-Prensa. Madrid. 541 pp.
- REGÜÉS, D., y F. GALLART (2004). Seasonal patterns of runoff and erosion responses to simulated rainfall in a badland area in mediterranean mountain conditions (Vallcebre, southeastern Pyrenees). *Earth Surf. Process. Landforms*, 29: 755-767.
- REGÜÉS, D., R. GUÁRDIA y F. GALLART (2000). Geomorphic agents versus vegetation spreading as causes of badland occurrence in a Mediterranean subhumid mountainous area. *Catena*, 40: 173-187. doi: 10.1016/S0341-8162(99)00045-4
- REGÜÉS, D., E. NADAL-ROMERO, J. LATRON y C. MARTÍ-BONO (2009). Producción y transporte de sedimento en cárcavas desarrolladas en la depresión interior altoaragonesa (cuena de Araguás, Pirineo central). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 35 (2): 263-288.
- RIMMER, D. L., y D. J. GREENLAND (1976). Effects of calcium carbonate on the swelling behaviour of a soil clay. *European Journal Soil Science*, 27: 129-139.
- SOIL SURVEY LABORATORY (1996). *Methods manual*. Version 3.0. Kellog Soil Survey Laboratory (Soil Survey Investigations Report, 42). USDA. Lincoln (NE).
- SOLE, A., R. JOSA, G. PARDINI, R. ARINGHERI, F. PLANA y F. GALLART (1992). How mudrock and physical properties influence badland formation at Vallcebre (Pre-Pyrenees, NE, Spain). *Catena*, 19: 287-300.
- SUMMA, V., F. TATEO, L. MEDICI y M. L. GIANNOSI (2007). The role of mineralogy, geochemistry and grain size in badland development in Pisticci (Basilicata, Southern Italy). *Earth Surface Processes and Landforms*, 32 (7): 980-997.
- THOMAS, P. J., J. C. BAKER y L. W. ZELAZNY (2000). An expansive soil index for predicting shrink-swell potential. *Soil Science Society of America Journal*, 64 (1): 268-274.
- UNE 103-103-94. *Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande*.
- UNE 103-104-93. *Determinación del límite plástico de un suelo*.

- VALERA-VALERA, A., C. SUMOZA-AGRAZ, J. FERRER-ESPY, S. RODRÍGUEZ-PARILLI y W. TOVAR (2006). *Análisis físico de suelos. Sistema de riego del río Tiznados*. 19 pp.
- VERICAT, D., M. W. SMITH y J. BRASINGTON (2014). Patterns of topographic change in sub-humid badlands determined by high resolution multi-temporal topographic surveys. *Catena*, 120: 164-176.