

HORIZONTES DE FRAGIPAN DE TIPO «ISON» FORMADOS POR PERMAFROST EN LA SIERRA DE GUADARRAMA

J. Gallardo, A. Alvarez y V. Cala*

RESUMEN

Se estudia en la Sierra de Guadarrama una toposecuencia edáfica que incluye suelos con fragipan de tipo «ison» (Fitz Patrick, 1974). La presencia de estos suelos en la parte alta de la sierra confirma la formación de permafrost en el último período frío. Además, los datos analíticos y las observaciones de campo permiten establecer, hipotéticamente, tres etapas en la evolución de los suelos: 1) alteración y edafización anterior al período frío; 2) compactación y densificación de la masa del suelo en las zonas afectadas por permafrost; 3) fenómenos de truncamiento, fosilización y edafización en el Holoceno. En cuanto al clima se concluye que la temperatura media anual en el último período frío debió ser entre 7,5°C y 12,5°C inferior a la actual.

Palabras clave: *fragipan, ison, periglacialismo, permafrost.*

ABSTRACT

A toposequence of soils that includes soils with fragipan of ison sort (FitzPatrick, 1974) is studied in the Sierra de Guadarrama. The presence of these soils in the high part of the mountain confirms the permafrost formation in the last glaciation. On the other hand, the analytical data and the field observations of soils allow us to establish, hypothetically, three stages in their evolution: 1) prewärm weathering and pedogenesis; 2) compaction and densification of the soils mass in the area affected by the permafrost; 3) truncation, fossilization and pedogenesis phenomena in the Holocene. About the climate the mean annual temperature in the last cold period must have been between 7,5°C and 12,5°C lower than now.

Key words: *fragipan, ison, periglacial, permafrost.*

Introducción

Los períodos fríos del Pleistoceno impusieron, por debajo de las áreas glaciales de la alta montaña española y descendiendo hasta cotas aún no bien establecidas, condiciones periglaciales. El dominio periglacial se caracteriza por un régimen climático extremadamente frío. Ahora bien, en dicho dominio es posible distinguir dos áreas: una, la de clima más frío, con suelo permanentemente helado o permafrost; y otra, con gran número de ciclos anuales de hielo deshielo. En España existe una abundante bibliografía sobre los depósitos y estructuras resultantes de las acciones hielo deshielo, pero no se ha abordado aún el análisis de los vestigios heredados de un posible permafrost, la característica más destacada del mundo periglacial aunque no se presente en todo él.

El área ocupada por permafrost en el pasado puede ser establecida mediante el reconocimiento de una variedad del horizonte de fragipan designada «ison» (Fitz Patrick, 1956, 1974).

Los suelos con horizonte de fragipan han sido estudiados fundamentalmente en Estados Unidos donde son particularmente abundantes en el centro y este del país (Grossman *et al.*, 1969). Las condiciones climáticas bajo las que se presentan son frías o cálidas pero siempre húmedas, y como materiales originarios han sido citados tillitas glaciales, loess, depósitos coluviales, aluviales, marinos, lacustres y de solifluxión, regolitos y sedimentos arcillosos terciarios (Carlisle *et al.*, 1957; Petersen *et al.*, 1970; Fitz Patrick, 1974; Wang *et al.*, 1974; Guitian, *et al.*, 1976). De acuerdo con Carlisle *et al.*, 1957, el fragipan es un horizonte compacto (con elevada

* Departamento de Química Agrícola, Geología y Geoquímica. Universidad Autónoma. 28049-Madrid.

densidad aparente), duro o extremadamente duro en seco, firme o muy firme en húmedo y frágil tanto en húmedo como en seco. La característica peculiar, aunque no exclusiva, es su fragilidad en seco y principalmente en húmedo. Por fragilidad se entiende el comportamiento de los agregados que resisten una presión creciente sin deformación apreciable hasta que se alcanza un punto crítico en que se rompen de pronto en fragmentos (rotura explosiva). La fragilidad parece deberse a la unión de las partículas minerales de tamaño limo y arena por arcillas y materiales amorfos (Knox, 1957; Yassoglou *et al.*, 1960; Jha *et al.*, 1963; Hutchenson *et al.*, 1964; Nettleton *et al.*, 1968; FitzPatrick, 1974; Wang *et al.*, 1974; Harlan *et al.*, 1977; Hallmark *et al.*, 1979; Steinhard *et al.*, 1979; Norton, 1984; Prasad *et al.*, 1984).

Otras características secundarias y, por tanto, no siempre presentes son: alto contenido en limo, arena muy fina o arena fina; moderado o bajo contenido en arcilla y materia orgánica; moteados y caras decoloradas en los agregados (las últimas dibujan polígonos en un plano horizontal); límite superior plano y claramente identificable; cutanes de arcilla; y pocas raíces, concentradas en las grietas que definen la estructura.

Los horizontes de fragipan no son el resultado de un único proceso genético. Así, FitzPatrick (1956, 1974), distingue entre «fragon» e «ison». El último proviene de un permafrost desarrollado en alguno de los períodos fríos del Pleistoceno. La formación del permafrost en el período frío y su posterior desaparición con el mejoramiento climático son responsables de algunas de las características más importantes de esta variedad de fragipan. La congelación del agua del suelo comprime el material mineral y explica la elevada densidad aparente, la estructura masiva o lenticular y la frecuencia de poros vesiculares cerrados. La fusión del hielo que rellena los huecos y forma películas en torno a las gravas da origen a un amplio espacio poroso y a un rápido flujo de materiales finos, principalmente limosos, que rellenan total o parcialmente los poros y forma típicos cutanes en la parte superior de las gravas. Así, las tres propiedades peculiares de un horizonte de fragipan de tipo «ison» proveniente de un permafrost son: 1) estructura masiva o lenticular; 2) poros esféricos o vesiculares cerrados, y 3) cubiertas de material fino (limos) en la parte superior de arenas, gravillas y gravas.

El objetivo de este trabajo consiste en establecer por primera vez la existencia de suelos con horizonte de fragipan de tipo «ison» en la Sierra de Guadarrama, determinar su área de distribución (que equivale a la del antiguo permafrost), elaborar una hipótesis sobre

el proceso evolutivo de los suelos y extraer de todo ello algunas conclusiones paleoclimáticas (1).

Morfología de los suelos

Los datos sobre situación, características del medio y morfología de los suelos están recogidos en la figura 1 y en las tablas 1 y 2. Los suelos estudiados están situados en el sector central de la Sierra de Guadarrama, aproximadamente entre 1.850 metros, cota algo inferior a la de las morrenas terminales, y 1.100 metros, base de la sierra e inicio de la rampa. Por tanto, ocupan la parte de las vertientes que nunca han sido cubiertas por nieves perpetuas. Se localizan en exposiciones norte, donde la acción del frío ha sido

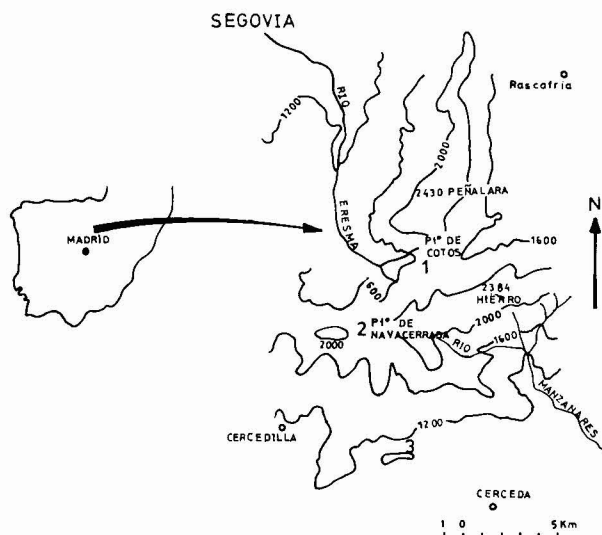


Fig. 1.—Esquema topográfico de la Sierra de Guadarrama y localización de los perfiles.

más intensa. Los materiales originarios son depósitos pedregosos de ladera con poca matriz fina en el suelo 1 y productos de la alteración de las rocas intrusivas en los suelos 2 y 3. Los suelos 1 y 2, con régimen térmico «criyc», tabla 3, tienen perfiles complejos claramente diferenciados en dos partes. El suelo 1 está constituido por un «bisequum»: úmbrico-cámbico y ócrico-fragipan, y el suelo 2 por un «sequum» en la parte superior con su correspondiente horizonte C y un horizonte de fragipan en la inferior, fig. 2. Tanto el suelo 1 como el 2 tienen discontinuidades litológicas señaladas por números romanos, tabla 2.

Los autores agradecen las observaciones y críticas hechas al avance de este trabajo (Gallardo *et al.*, 1987) presentado en la VII Reunión Nacional de AEQUA. Tales críticas han servido para perfilar algunos aspectos de esta publicación.

Tabla 1.—Características de las zonas de los perfiles.

Perfil	1	2	3
Latitud	40°49' N	40°47'30" N	40°44' N
Longitud	3°59' W	4°00'30" W	3°59' W
Localización	Puerto de Cotos	Puerto de Navacerrada	Navacerrada
Vegetación	Pinus sylvestris	Pinus sylvestris	Matorral mediterráneo
Topografía	Montañosa	Montañosa	Colinas
Pendiente	37%	32%	14%
Altitud	1.820 m.	1.870 m.	1.120 m.
Orientación	NW	NE	NE
Material originario	Depósitos de ladera	Granito	Granito

La discontinuidad litológica es extrema en el suelo 2, donde los horizontes superiores A, B y C están desarrollados sobre un material aluviocoluvionar y el fragipán sobre el regolito. El suelo 3 tiene un perfil simple y además no presenta ningún rasgo de fragipanización.

Los horizontes de fragipán, simbolizados B_x y en este caso además con el subíndice «b» que indica su carácter de horizontes enterrados, tabla 2, tienen el límite superior a 165 centímetros de profundidad en el suelo 1 y a 80 centímetros en el suelo 2. Estos horizontes B_x son frágiles, compactos y algo cementados (cementación reversible, puesto que los agregados se desmoronan en agua); tienen estructura lenticular y presentan cutanes de limo en la parte superior de las gravas, fig. 3. La compactidad se pone de manifiesto por el hecho de que los sistemas radiculares no pueden penetrar en su interior y quedan retenidos en su límite superior. Los horizontes B₂ de los «sequa» superiores tienen también gravas con cutanes de limo, pero no son frágiles, compactos ni cementados.

El subgrupo al que pertenecen los distintos suelos y la secuencia de horizontes de diagnóstico (Soil Taxonomy, 1975) que les caracteriza se indica en la fig. 2.

El delgado horizonte A₂ del suelo 1, fig. 2, se prolonga en el fragipán por medio de delgadas venas

de color blanco. Una formación similar ha sido descrita por Hallmark *et al.* (1979), en suelos con fragipán del NE de Ohio. En el suelo 2 no existe ese horizonte, pero en el B, aparecen áreas de arena blanca que constituyen un moteado relativamente importante.

Datos analíticos

La tabla 4 recoge los datos analíticos más importantes de los tres suelos estudiados. Los suelos 1 y 2 tiene pH muy ácido, inferior a 5, y el suelo 3 ácido, aproximadamente 5,5. El valor del pH se mantiene prácticamente homogéneo a lo largo de los perfiles, por tanto, al contrario de lo que encuentra Steinhardt *et al.* (1979) en este caso el pH no descende en los horizontes de fragipán. Todos los suelos tienen textura arenosa, 70-80% de arena. Los horizontes de fragipán, B_x, de los suelos 1 y 2, dentro del carácter netamente arenoso y de la pobreza en arcilla, aproximadamente 3%, presentan distinto contenido en limo: 20-25% el del suelo 1 y, aproximadamente, 10% el del 2. Por tanto, el primero tiene una textura típica del «ison» de FitzPatrick (1974) (arena, 60-75%; limo, 20-40%; arcilla, 3-10%) pero no así el segundo. La densidad aparente es siempre

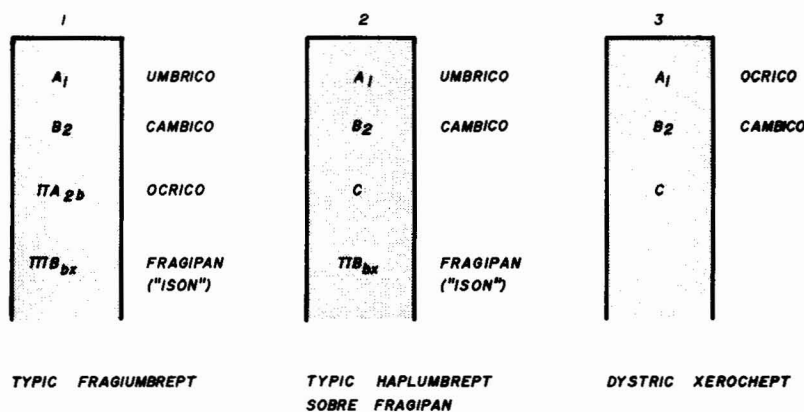


Fig. 2.—Horizontes de diagnóstico y tipos (subgrupos) de suelos.

Tabla 2.—Propiedades morfológicas de los suelos.

Perfil	Horizonte	Espesor cm.	Textura	Color (húmedo)			Piedras %	Estructura	Consistencia húmedo	Cutanes textura	Límite inferior	Otras características
				Matriz	Moteados	Cutanes						
1	A _{co}	3-0		Restos vegetales								
	A ₁	0-70	f.a.	10YR 2/2			70	Grumosa	Suelto		Neto y plano	Abundantes raíces
	B ₂	70-160	a.f.	2,5Y-10YR 6/4			60	Poliédrica ang.	Muy friable	Limo*	Gradual y plano	Frecuentes raíces
	IIA _{2b}	160-165	a.f.	2,5Y 6/4				Masiva	Suelto		Brusco e irreg.	Sin raíces, quedan retenidas en su límite superior.
	IIIB _{2a1}	165-280	a.f.	10YR 5/8			10YR 5/7	40 Lenticular	Friable (frágil)	Limo*	Difuso y plano	Lenguas de arena blanca de 0,5-1 cm. de ancho.
IIIB _{2a2}	+280	a.f.	10YR 5/6			10YR 5/6	40 Lenticular	Friable (frágil)	Limo*		Lenguas de arena blanca de 0,5 cm. de ancho.	
2	A _{co}	12-0		Restos vegetales								
	A ₁	0-15	f.a.	7,5YR 3,5/3				Grumosa	Muy friable		Neto y plano	Abundantes raíces
	B ₂	15-50	f.a.	10YR 5/8			10YR 5/8	10 Polied. subang.	Muy friable	Limo*		Abaundantes raíces
	C	50-80		HORIZONTE CONSTITUIDO POR CUATRO CAPAS SEDIMENTARIAS DE DISTINTA TEXTURA								
	IIB _{2a}	80-120	a.f.	5Y 4/3,5	Blancos 20%	5Y 4/3,5		Masiva, lenticular	Muy friable (frágil)	Limo*	Neto y Plano	Sin raíces; quedan retenidas en su límite superior.
	IIIC _{2a}	120-150	a.	5Y 5/4	Blancos 20%			Masiva, poliédrica angular	Muy friable (frágil)	Limo*	Difuso e irreg.	
IIIC _{2a}	+150		2,5Y 5/4				Granular	Muy friable (algo frágil)	Limo*			
3	A ₁	0-20	a.f.	10YR 3/2,5				Grumosa, poliédrica subangular	Muy friable		Neto y Plano	Abundantes raíces.
	B ₂₁	20-40	f.a.	10YR 5/6				Masiva, poliédrica angular	Muy friable		Neto y plano	Frecuentes raíces
	B ₂₂	40-80	f.a.	2,5Y 4/4				Masiva, poliédrica angular	Muy friable			Frecuentes raíces
	C ₁	80-220	f.a.				7,5YR 5/8		Muy friable	Arcilla		Escasas raíces; bandas horizontales de 1-2 cm. de ancho, separadas verticalmente 5-10 cm., de material idéntico al del B ₂
	IIIC ₂	220-270					10YR 5/8		Firme	Arcilla		
IIIC ₃	+270							Firme				

* Cutanes de limo cubriendo la parte superior de las gravas.

f.a.=Franco arenoso.

a.f.=Arenoso franco.

a.=Arenoso.

Tabla 3 (1).—Datos térmicos del aire y del suelo

Perfiles	T m anual °C	T m verano °C	T m invierno °C	T m anual aproximada del suelo °C	Régimen térmico del suelo
1 y 2	6,5	14,8	-1	7,5	CRYIC
3	11,4	20,9	2,7	12,4	MESIC

(1) Elaborada a partir de los datos climáticos de Nicolas, J. P.; Casado, L. G. y San Juan, J. G. (1979). Climatología clásica de la subregión de Madrid. COPLACO, 261 pp.

mayor en los horizontes de fragipan que en los horizontes superiores y en los del suelo 3. El valor de la densidad aparente en los fragipanes es 1,8-2,0, valor particularmente elevado, sobre todo, teniendo en cuenta el carácter netamente arenoso de estos horizontes.

Las bases de cambio son muy escasas y la capacidad de cambio catiónico más bien alta, incluso en los horizontes con poca materia orgánica, en relación con el contenido en arcilla, principalmente en los suelos 1 y 2. El valor de la suma de bases es



Fig. 3.—Cutan de limo en la parte superior de una grava del horizonte IIIB_{ox1} del suelo 1.

Tabla 4.—pH, materia orgánica, análisis mecánico, densidad aparente, grado de saturación, capacidad de cambio.

Horizonte	Profundidad cm	pH		Materia orgánica %	Análisis mecánico			Densidad aparente (g/cm ³)	Suma de bases m.e./100 g	Capacidad cambio m.e./100 g	Grado de saturación %
		H ₂ O	CIK		2-0,05 mm.	0,05-0,002 mm.	<0,002 mm.				
PERFIL 1											
A ₁	0-70	4,5	4,0	14,4	71,5	19,9	8,6	0,48	0,9	21,3	4,2
B ₁	70-160	4,7	4,3	1,5	77,6	19,4	3,0	1,50	1,4	4,3	32,5
IIA ₁ b	160-165	4,7	4,2	0,6	71,8	27,1	1,1	1,20	2,7	3,3	81,8
IIIB _{ox1}	165-280	4,6	4,2	0,7	74,9	22,7	2,4	2,00	1,2	3,0	33,3
IIIB _{ox2}	+280	4,7	4,2	0,4	71,5	25,9	2,6	1,80	1,0	4,0	25,0
PERFIL 2											
A ₁	0-15	4,8	4,0	6,4	76,6	17,2	6,2	0,90	1,0	12,0	8,3
B ₁	15-50	4,6	4,2	1,4	62,9	32,5	4,6	1,40	0,5	12,0	4,2
IIIB _{ox}	80-120	4,5	4,0	0,4	83,3	13,3	3,4	1,90	1,0	6,0	16,6
IIIBC _{ox}	120-150	4,9	4,1	0,7	88,5	8,7	2,8	1,90	0,7	3,5	20,0
PERFIL 3											
A ₁	0-20	5,8	5,0	5,2	77,9	15,9	5,7	1,10	4,6	5,8	79,3
B ₂₁	20-40	5,3	3,8	0,7	67,6	36,7	5,7	1,60	2,4	6,0	40,0
B ₂₂	40-80	5,6	3,7	0,7	67,7	26,0	6,3	1,50	2,1	6,5	32,0
C ₁	80-220	5,8	3,7	0,5	72,1	16,3	11,6	1,70	5,0	5,5	90,9

máximo en la superficie de los fragipan, lo que indica que los horizontes B₁ constituyen un freno para el proceso de lavado. Por el contrario, las bases tienden a acumularse en el horizonte superficial del suelo 3, indicando una lixiviación moderada y aporte de bases en la superficie por el ciclo biogeoquímico.

Micromorfología

Perfil 1, horizonte B₁ —fragipan—.

Destaca el carácter denso de la fábrica y la microestructura masiva. No hay agregación. La porosidad es escasa y predominan los poros vesiculares. El material grueso (cuarzo, feldespato y micas, así como algunos fragmentos de rocas) tienen fundamentalmente formas redondeadas. Los feldespatos y las micas muestran un ligero grado de alteración (5-10% de la superficie alterada). Presenta algunos rasgos edáficos de tipo cutan: siltanes y argilanes de grano, ambos embutidos en la masa del suelo. Los siltanes son pardo oscuros, de 0,2-0,4 mm. de grosor y cubren tan sólo la parte superior de los fragmentos de rocas más gruesos.

Perfil 2, horizonte B₁ —fragipan—.

Tiene textura porfirica constituida por granos minerales (plagioclasas, cloritas, cuarzos y biotitas de tamaño medio 0,5 mm.) y gruesos fragmentos de rocas encajados en una densa matriz limosa (cloritas, plagioclasas y cuarzos). La microestructura es poliédrica moderadamente desarrollada, definida por fisuras de 0,1-0,2 mm. de ancho. La alteración, liberación de hierro, es muy clara en las cloritas y biotitas (aunque no afecta a todos los minerales de este tipo). Muestra tres tipos de cutanes todos embutidos en la masa del suelo: ferranes, adheridos a algunas partículas minerales y rellenando fisuras; siltanes, pardo oscuros, de 0,15-0,30 mm. de grosor y cubriendo sólo la parte superior de los granos minerales más gruesos; y algunos argilanes muy delgados.

Perfil 3, horizonte B₂ —cámbico— y horizonte C.

El horizonte B₂ tiene microestructura poliédrica subangular moderadamente desarrollada definida por canales. Los agregados muestran en su interior algunas cavidades. Aparecen frecuentes raíces y restos vegetales poco descompuestos. El material grueso está constituido por cuarzos, feldespatos (a veces, muy grandes, 4×6 mm.) fragmentos de roca y biotitas; estas últimas con indicios de alteración física (separación de láminas). Presenta argilanes de poro con grosor próximo a 0,1 mm., color gris y gran birrefringencia; a veces rellenan completamente algunas cavidades. El horizonte C, por el contrario, muestra rasgos de apreciable alteración química y ferriargilanes de color rojo intenso, que, como se indica en la tabla 2, son también observables macromorfológicamente.

Discusión

La existencia de suelos con horizonte de fragipan de tipo «ison» confirma la formación de permafrost en la Sierra de Guadarrama. Tal permafrost es atribuible al periglaciario del último período frío. Con base en lo anterior puede intentarse establecer la secuencia evolutiva de los suelos y situar cronológicamente, en sentido muy amplio, los hechos fundamentales, fig. 4. Antes del último período frío o en sus etapas iniciales se formaron suelos en la parte alta de la sierra sobre depósitos pedregosos de ladera (suelo 1) y regolitos de rocas intrusivas (suelo 2) caracterizados por un epipedión y un horizonte cámbico con algunos argilanes de grano libres. El epipedión y el horizonte cámbico resultaron de un proceso de empardecimiento y los argilanes de una incipiente iluviación de arcilla. Por el contrario, en la base de la sierra, suelo 3, es posible pensar en una formación fersialítica (Vaudour, 1979) en una etapa cálida anterior al período frío, posteriormente muy degradada por erosión; aunque también podría deberse a una evolución condicionada por el material originario (Benayas *et al.*, 1981). En alguna fase del último período frío los suelos 1 y 2 estuvieron sometidos a perturbaciones físicas: la parte superior de los suelos, capa activa, a expansiones y contracciones por las acciones hielo-deshielo que orientarían verticalmente las gravas; y la inferior, permafrost, a compactación por la formación de cristales de hielo alrededor de las gravas y en los poros y grietas, que elevaría la Da y transformaría los argilanes de granos libres en argilanes embutidos en la masa del suelo. Por el contrario, el suelo 3, no fue afectado por condiciones periglaciares tan severas y el permafrost no alcanzó las zonas donde este suelo se encuentra. El mejoramiento climático del Holoceno provoca la desaparición del permafrost, que deja en el suelo un amplio espacio poroso, y genera un rápido flujo de materiales finos (limos) que rellena los poros y crea los cutanes de limo en la parte superior de las gravillas y gravas. De esta manera, al final del último período frío se forma el fragipan de tipo «ison», que debe la fragilidad a la densificación, causada tanto por el crecimiento de los cristales de hielo como por el relleno limoso de los huecos tras la fusión, y la cementación a los argilanes embutidos en la masa del suelo que sirven de unión entre las partículas minerales. La evolución del suelo 3 que no fue afectado por permafrost es en cierta manera más compleja; parece ser que entre el «solum» (horizontes A y B) y el horizonte C existe una discontinuidad litológica que no confirma el análisis mecánico, tabla 4, pero detecta la micromorfología (escasa alteración y argilanes grises en B₂, intensa alteración y ferriargilanes rojos en C). Ello hace pensar, como indica Vaudour (1979), en un truncamiento del antiguo

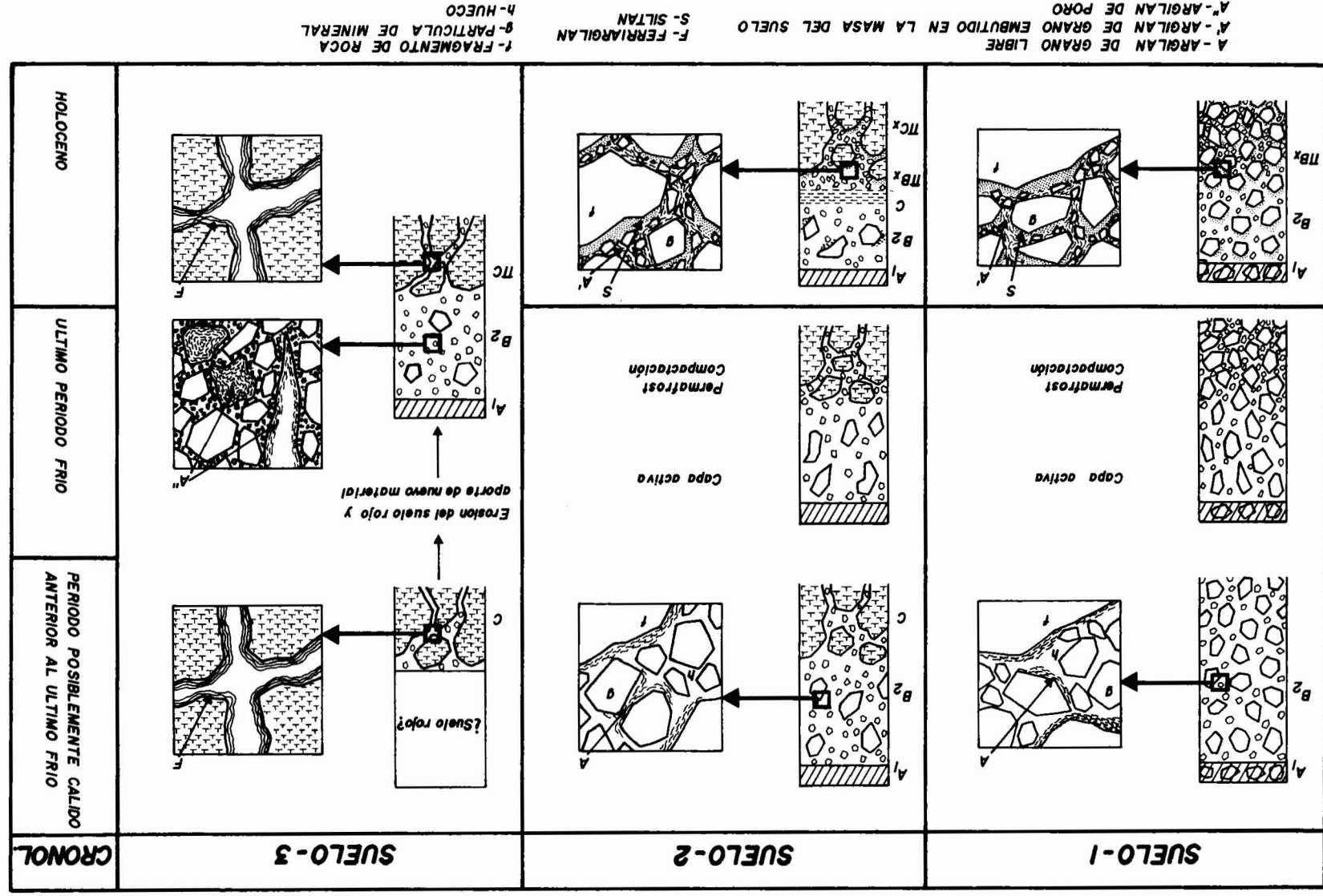


Fig. 4.—Secuencia evolutiva de los suelos y cronología relativa.

«solum» y posterior sedimentación de nuevos materiales sobre los que un proceso de edafización diferencia un epipedión ócrico y un horizonte cámbico con ciertos rasgos de iluviación (argilanes grises), mientras el horizonte subyacente, ahora IIC, conserva las propiedades adquiridas en la etapa cálida anterior. Finalmente, en la parte alta de la sierra, ya en el Holoceno, los movimientos de masa: coluviones, solifluxiones, etc., erosionaron las capas activas y depositaron, fosilizando los horizontes B_x, materiales procedentes de fragipanes situados a mayor cota, lo que explica que existan cutanes de limo en las gravas que contienen, tabla 2. Sobre estos materiales se ha formado, en un período de tiempo relativamente corto, un nuevo suelo caracterizado por un epipedión úmbrico y un horizonte cámbico.

La formación de permafrost en la parte alta de la sierra exige que el régimen térmico del suelo, «cryic» en la actualidad, tabla 3, fuera «pergelic» en el período frío (temperatura media anual del suelo inferior a 0°C, Soil Taxonomy, 1975). En consecuencia, la temperatura media anual, al menos en alguna fase de ese período frío, debió ser entre 7,5°C y 12,5°C, más baja que la actual. Ahora bien, hay que tener en cuenta que los suelos con fragipan de tipo «ison» estudiados se encuentran en la zona que en la actualidad tiene una temperatura media anual del suelo de 7,5°C y en exposiciones norte, por tanto, el descenso térmico debió de ser más próximo a 7,5°C que a 12,5°C, e incluso menor si únicamente hubiera suelos con fragipan de tipo «ison» en las exposiciones norte.

Conclusiones

- Se establece por primera vez la existencia de suelos con fragipan de tipo «ison», es decir provenientes de un permafrost, en la parte alta de la zona central de la Sierra de Guadarrama.
- La evolución de los suelos es compleja, pudiendo distinguirse tres fases:
 - I. Edafización poco marcada en la parte alta de la sierra, caracterizada por empardecimiento y argiluvación incipiente. Edafización más intensa en la base de la sierra, quizás de tipo fersialítico (Vaudour, 1979).
 - II. Formación de permafrost en la parte alta de la sierra con la consiguiente compactación de los suelos. Truncamiento de algunos suelos en la base de la sierra, con posterior sedimentación de nuevos materiales, sobre los que, en fecha difícil de precisar, se inicia una nueva edafización que ahora alcanza un grado de evolución menor que en la fase anterior.
 - III. Desaparición del permafrost al inicio del Holoceno que permite completar el desarrollo de los

horizontes de fragipan de tipo «ison». Posteriores fases de erosión sedimentación eliminaron las capas activas y aportaron, fosilizando los horizontes B_x, materiales procedentes de fragipanes situados a mayor cota. Sobre estos materiales se da, ya en fecha muy reciente, un nuevo proceso de edafización que diferencia un horizonte úmbrico y otro cámbico.

- La temperatura media anual durante alguna fase del último período frío en la Sierra de Guadarrama fue a lo sumo entre 7,5°C y 12,5°C inferior a la actual.
- Los horizontes de fragipan de tipo «ison» de la Sierra de Guadarrama son equivalentes a los horizontes B_x con débil transformación del material originario de Grossman *et al.* (1969).

Referencias

- Benayas, J.; García-González, M. T.; Guerra, A. (1981). Procesos de rubefacción en la Sierra de Guadarrama. *An. Edaf. y Agrob.*, 40, 865-878.
- Carlisle, F. J.; Knox, E. G.; Grossman, R. B. (1957). Fragipan horizons in New York Soils: I. General Characteristics and distribution. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 21, 320-321.
- Fitzpatrick, E. A. (1956). An indurated soil horizon formed by permafrost. *J. Soil Sci.*, 7, 248-255.
- Fitzpatrick, E. A. (1974). Cryons and isons. Proceedings of north of England soils. 11, 31-43.
- Gallardo, J.; Alvarez, A. M.; Cala, V. (1987). Suelos con fragipan: indicadores de permafrost. *VII Reunión sobre el Cuaternario*. Actas. AEQUA, Santander, 81-84.
- Grossman, R. B.; Carlisle, F. J. (1969). Fragipan soils of the Eastern United States. *Advances in Agronomy.*, 21, 237-279.
- Guitian, F.; Macías, F. (1976). Suelos de la zona húmeda española-VIII. *An. Edaf. y Agrob.*, 35, 47-69.
- Hallmark, C. T.; Smeck, N. E. (1979). The effect of extractable aluminium, iron and silicon on strength and bonding of fragipans of Northeastern Ohio. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 43, 145-150.
- Harlan, P. W.; Franzmeier, D. P.; Roth, C. B. (1977). Soil formation on loess in Southwestern Indiana: II. Distribution of clay and free oxides and fragipan formation. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 41, 99-103.
- Hutchenson, T. B.; Bailey, H. H. (1964). Fragipan soils: certain genetic implications. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 283, 684-685.
- Jha, P. P.; Cline, M. G. (1963). Morphology and genesis of a soil brun acide with fragipan in uniform silty material. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 27, 339-344.
- Knox, E. G. (1957). Fragipan horizons in New York soils: III. The basis of rigidity. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 21, 326-330.
- Nettleton, W. D.; Daniels, R. B.; McCracken, R. J. (1968). Two North Carolina coastal plain catenas I. Morphology and fragipan development. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 32, 577-582.
- Nicolas, J. P.; Casado, I. G.; San Juan, J. G. (1979). Climatología básica de la subregión de Madrid. *COPLACO*. 261 págs.
- Norton, L. D.; Hall, G. F.; Smeck, N. E.; Bigham, J. M.

- (1984). Fragipan bonding in a late-Wisconsinian loess-derived soil in Eastcentral Ohio. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 48, 1360-1366.
- Petersen, G. W.; Ranney, R. W.; Cunningham, R. L.; Matelski, R. P. (1970). Fragipans in Pennsylvania soils: A statistical study of Laboratory data. *Soil Sci. Amer. Proc.*, 34, 719-722.
- Prasad, K. G.; Perkins, H. F. (1984). Ocurrence and characteristics of fragipan-like formations in selected coastal plain soils. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 32, 725-730.
- Soil Taxonomy (1975). Soil conservation service U. S. Department of Agriculture. *Agriculture Hand Book* nº 436.
- Steinhardt, G. C.; Franzmeier, D. P. (1979). Chemical and mineralogical properties of the Fragipans of the Cincinnati Catena. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 43, 1008-1013.
- Vaudour, J. (1979). *La región de Madrid. Alterations, sols et paleosols*. Ed: Ophrys. 390 pág.
- Wang, C.; Nowland, J. L.; Kodama, H. (1974). Properties of two fragipan soils in Novascotia including scanning electron micrographs. *Can. J. Soil Sci.*, 54, 159-170.
- Yassoglou, N. J.; Whitside, E. P. (1960). Morphology and genesis of some soils containing fragipans in northern Michigan. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 24, 396-407.

Recibido el 10 de noviembre de 1987

Aceptado el 15 de febrero de 1988