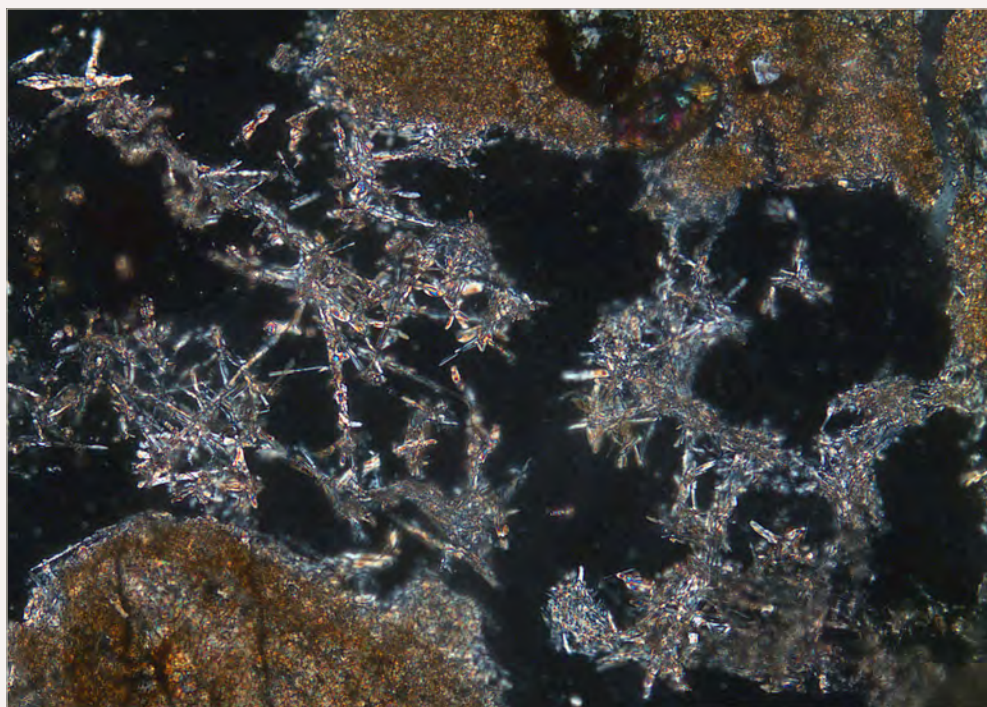


# Paleosols: una porta als paisatges del passat a través del microscopi

Discurs de presentació de Rosa Maria Poch Claret  
com a membre numerària de la Secció de Ciències  
i Tecnologia, llegit el dia 22 de novembre de 2021



Institut  
d'Estudis  
Catalans

SECCIÓ  
DE CIÈNCIES  
I TECNOLOGIA



Paleosols: una porta  
als paisatges del passat  
a través del microscopi



# Paleosols: una porta als paisatges del passat a través del microscopi

Discurs de presentació de Rosa Maria Poch Claret  
com a membre numerària de la Secció de Ciències  
i Tecnologia, llegit el dia 22 de novembre de 2021

Barcelona, 2022



Institut  
d'Estudis  
Catalans

SECCIÓ  
DE CIÈNCIES  
I TECNOLOGIA

Biblioteca de Catalunya. Dades CIP

**Poch, Rosa M., autor**

Paleosols: una porta als paisatges del passat a través del microscopi. Primera edició. — 2022

Bibliografia

ISBN 9788499656465

I. Institut d'Estudis Catalans. Secció de Ciències i Tecnologia. II. Títol

1. Paleopedologia 2. Sòls — Micromorfologia

56:631.4

© Rosa Maria Poch Claret

© 2022, Institut d'Estudis Catalans, per a aquesta edició

Carrer del Carme, 47. 08001 Barcelona

Primera edició: març del 2022

Text revisat lingüísticament per la Unitat d'Edició del Servei Editorial de l'IEC

Disseny de la coberta: Azcunce | Ventura

Imatge de la coberta: Rebliment de cristalls aciculars de calcita dins d'un porus del sòl.

Microfotografia de l'autora

Compost per la Unitat de Producció del Servei Editorial de l'IEC

Imprès a Service Point FMI, SA

ISBN: 978-84-9965-646-5

Dipòsit Legal: B 6026-2022

DOI: 10.2436/10.2000.70.1



Aquesta obra és d'ús lliure, però està sotmesa a les condicions de la llicència pública de Creative Commons. Es pot reproduir, distribuir i comunicar l'obra sempre que se'n reconegui l'autoria i l'entitat que la publica i no se'n faci un ús comercial ni cap obra derivada. Es pot trobar una còpia completa dels termes d'aquesta llicència a l'adreça: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/deed.ca>.

## 1. QUÈ SÓN ELS PALEOSOLS?

Abans de definir els paleosols és convenient dir prèviament què són els sòls. Això es deu, entre altres raons, al fet que els sòls tenen significats molt diversos segons la disciplina que els estudiï, i també perquè són, en part, desconeguts per la manca de percepció que la societat en té en general (Poch, 2021; Hartemink, 2016). Segons el *Diccionari multilingüe de la ciència del sòl* (Porta, 2014), el sòl és un cos natural que s'ha format a la superfície terrestre; està format per minerals, matèria orgànica, líquids i gasos; està organitzat en capes o horitzons; forma un contínuum de gruix variable que constitueix la coberta edàfica de la majoria de la superfície terrestre i la variabilitat de la qual defineix l'edafodiversitat d'un territori; té aptitud per: *a*) sustentar els ecosistemes terrestres perquè permet el creixement de les plantes i altres organismes, als quals subministra nutrients, oxigen, aigua i ancoratge o, si escau, hàbitat, i *b*) desenvolupar un conjunt de funcions ambientals i proveir serveis ecosistèmics (Pereira *et al.*, 2018). Les persones no especialistes perceben el sòl senzillament com el suport on creixen les plantes, és a dir, no pel que intrínsecament és, sinó per un dels anomenats *serveis ecosistèmics dels sòls* —la producció de biomassa—, que, de fet, va ser el primer que es va reconèixer i que va permetre el naixement de la ciència del sòl o edafologia gràcies a V. V. Dokutxaïev (1846-1903).

Els sòls, però, no «serveixen» només per a fabricar la biomassa que ens alimenta, ens vesteix i ens escalfa, sinó que tenen moltes altres funcions o serveis ecosistèmics que s'han anat recollint i reconeixent al llarg del temps, tal com es mostra en la infografia de l'Organització de les Nacions Unides per a l'Alimentació i l'Agri-

cultura (FAO, de l'anglès Food and Agriculture Organization) de la figura 1. Una de les funcions que s'hi poden veure és la d'herència cultural i de registre d'ambients passats, que és la que fa del sòl l'objecte d'estudi en la geoarqueologia i en la paleoambientologia.

El sòl és el registre del passat perquè els seus factors formadors, que són el clima, el material originari, el relleu, els éssers vius i l'acció humana, varien al llarg del factor formador temps, i, per tant, algunes de les característiques dels sòls no són necessàriament el resultat de processos que ocorren en l'entorn actual, sinó per climes, plantes o activitats humanes del passat. Però, ben segur, la seqüència causal de formació de sòls (factors → processos → propietats i característiques), només la podrem invertir per fer inferències sobre paleoambients sempre que coneguem bé la seqüència. La seva validesa dependrà del grau en què les relacions siguin biunívocues, és a dir, del grau d'exclusivitat de les característiques resultants a partir d'una combinació concreta de factors formadors.

Desxifrar quins són els trets que es deuen a factors formadors diferents dels actuals no és una tasca fàcil, i encara menys ho és arribar a determinar quins són els factors formadors que els van causar. Per exemple, un tipus d'estructura lenticular es crea per la formació de lleties de gel dins del sòl; per tant, si en trobem en sòls catalans que actualment no es gelen, podria ser heretada de climes més freds en el passat. Igualment, una coberta vegetal de gramínies, de tipus estepari, fa que el sòl s'enriqueixi en matèria orgànica (s'enfosqueixi) homogèniament fins a on arriben les arrels (a diferència dels sòls sota boscos); per tant, si trobem horitzons gruixuts, foscos i porosos sota una vegetació de bosc podríem inferir que hi ha existit abans un paisatge amb una coberta densa de gramínies.

La definició de paleosol és implícita en el que acabem de dir, i seria un sòl que s'ha format en ambients passats (Yaalon, 1983; Costantini, 2018). Alguns autors fan la distinció entre paleosols —sòls enterrats de qualsevol edat, el funcionament dels quals ha quedat totalment o parcialment inhibit a partir del moment que han quedat colgats per nous materials— i sòls relictos —que pertanyen a la coberta actual del sòl, però amb característiques heretades del passat (paleotrets), resultants de condicions ambientals diferents de les actuals (Fedoroff, Courty i Guo, 2018). L'interès de l'estudi dels paleosols rau en el fet que permet establir, amb graus de precisió variables, com eren el clima, la vegetació, la topografia i, si escau, el maneig del sòl pels humans en temps pretèrits, a partir de trets que han quedat impresos en els sòls. És molt il·lustrativa l'analogia que fan alguns autors russos entre els sòls i els palimpsests (pergamins reutilitzats a l'edat mitjana per manca de paper), com a suports que van enregistrant els resultats d'entorns ambientals successius, alhora que en van esborrant alguns d'altres (Targulian i Goryachkin, 2004).

La persistència de la informació que emmagatzemen els sòls sobre paleoambients ha donat peu al fet que alguns autors parlin de la «memòria del sòl» (Targu-





FIGURA 1. Una de les funcions del sòl és el servei d'herència cultural, atès que el sòl és un registre d'ambients passats.  
 FONT: FAO, 2015.

lian i Goryachkin, 2004), la durada de la qual varia en funció de les característiques que s'analitzin. Yaalon (1971) classifica les propietats del sòl segons el lapse de temps que cal per al seu ajustament a l'entorn: *a*) propietats que s'ajusten ràpidament (anys fins a centenars d'anys), com l'acumulació de matèria orgànica, redistribució de sals o formació de clapejats redox; *b*) propietats que s'ajusten lentament (alguns milers d'anys), com l'acumulació d'argila, carbonats o compostos orgànics de ferro, i *c*) propietats persistents (que no mostren canvis des de fa més de deu mil anys fins a milions d'anys), com cimentacions o acumulacions de fases secundàries de carbonats o òpals, i rentatge de components meteoritzables, amb una acumulació residual de fases resistents (com la caolinita, els òxids de ferro o la bauxita). Aquest autor indica, a més, que, a mesura que s'apropen les propietats del sòl a un estat estacionari dinàmic, s'ajusten a velocitats decreixents.

En general, les característiques del sòl s'ajusten lentament quan la mida de les partícules és grossa (per exemple, sorra i grava), quan es formen capes cimentades (per exemple, horitzons petrocàlcics, duripans, petrofèrrics) i quan la mineralogia és termodinàmicament estable en condicions edàfiques (per exemple, quan conté quars, gibbsita, hematites, anatasa o zircó). Així, és possible classificar les dife-

rents característiques del sòl per llur sensibilitat o rapidesa amb què s'adapten a canvis ambientals, les quals es poden contraposar a les característiques del paisatge amb diferents graus de sensibilitat i memòria, segons Monger i Rachal (2013) (figura 2). En els sòls, els trets que s'adapten lentament són bons indicadors (bona memòria), perquè són els que costen més de variar o d'emascarar si canvien de nou les condicions, mentre que els que s'adapten ràpidament no són normalment bons marcadors. L'efecte «llegat» d'actuacions antròpiques en els sòls en el passat, que modifiquen el funcionament dels ecosistemes terrestres actuals (Monger *et al.*, 2015), és completament aplicable per determinar relacions causals entre característiques i factors formadors.

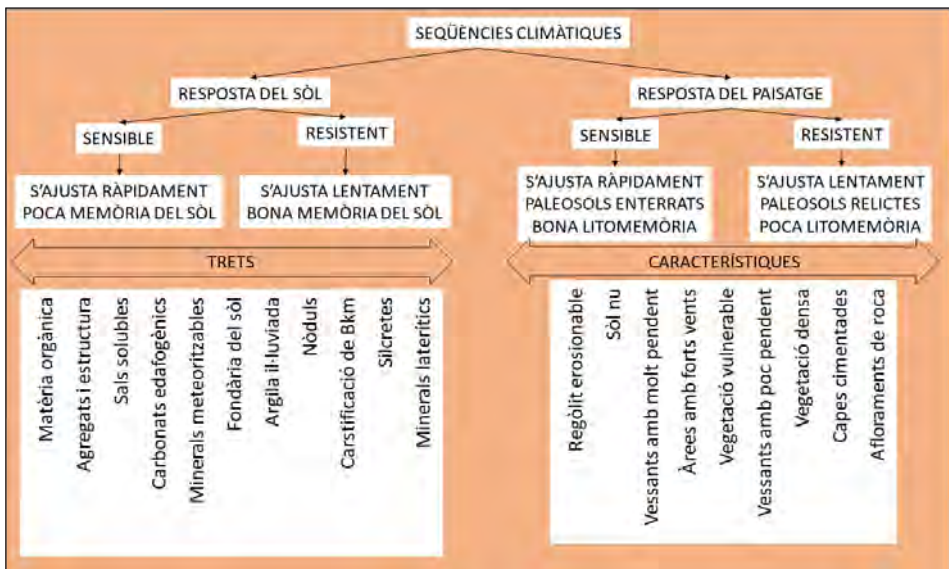


FIGURA 2. Trets i característiques de la memòria del sòl i del paisatge davant de seqüències de canvis climàtics.

FONT: Traduït i modificat de Monger i Rachal, 2013.

## 2. PALEOSÒLS I PALEOTRETOS MICROSCÒPICS

La micromorfologia del sòl és l'observació i la interpretació de mostres orientades no alterades de material del sòl amb l'ajut del microscopi (des del microscopi òptic fins a la submicroscòpia) per tal d'identificar-hi els components (inclosa la porositat) i determinar llurs relacions en l'espai i el temps. En el contínuum d'observació de la coberta del sòl: sistemes edàfics - horitzons - materials - organitzacions elementals (FAO-ISRIC-IUSS, 1998), es tracten els dos darrers nivells d'organitza-

ció, pels quals normalment es treballa amb làmines primes de sòls que s'observen al microscopi petrogràfic o en microscòpia electrònica i submicroscòpia. A escala de microagregats s'estudia, per exemple, les associacions organominerals o la variabilitat espacial de formes orgàniques mitjançant sincrotrons (Lehmann *et al.*, 2008). Altres tècniques d'anàlisi de sòls tracten mostres homogènies (en bossa), en les quals es perd l'heterogeneïtat i l'anisotropia, mentre que la micromorfologia permet observar i mesurar en mostres no pertorbades la microheterogeneïtat i l'anisotropia; és a dir, l'arquitectura i l'organització interna del sòl en el seu estat natural. Per exemple, una anàlisi química ens dirà el contingut total de carbonat de calci del sòl, mentre que la micromorfologia permet distingir entre l'origen litogènic, edafogènic o biogènic, així com les morfologies que presenta. W. L. Kubiëna (1897-1970), l'iniciador d'aquesta tècnica, utilitzava el símil del rellotge: per conèixer què és i com funciona un rellotge no se'ns acut pas d'analitzar-ne la composició elemental, sinó que mirarem de comprendre els engranatges dels seus components en l'espai, de manera semblant a com s'observen els components del sòl en una làmina prima.

La micromorfologia de sòls és la tècnica més útil per a identificar aquells processos de formació de sòls que no es corresponen amb les condicions actuals, i, per tant, és imprescindible per a comprendre com s'han format els paleosòls. Els sòls poligenètics, enterrats o no, resultants d'una successió de diferents combinacions de factors de formació, mostraran la superposició de trets característics de cadascun d'ells, de tal manera que serà possible establir la cronologia relativa dels processos, i possiblement de la seqüència de factors de formació que els han originat. Juntament amb les tècniques de datació adequades serà possible reconstruir registres paleoedàfics, especialment en formacions quaternàries. Les seqüències de paleosòls en *loess* són potser els exemples més coneguts de sòls enterrats des de finals del Cenozoic, perquè l'acreció dels dipòsits i la seva composició homogènia permeten que els processos de formació del sòl s'expressin i es mostrin com horitzons diferents en profunditat amb pocs encavallaments, com si fos un acordió que s'eixampla.

Per il·lustrar l'aplicació de la micromorfologia a la paleoedafologia, exposaré a continuació tres exemples en què es desxifren com eren els ambients passats en diferents escales de temps i d'espai: les terres roges mediterrànies, l'època preromana a les Garrigues i l'ús dels sòls a la Bolívia precolombina.

### **3. TRES PALEOPAISATGES A VISTA DE MICROSCOPI**

#### **3.1. *La terra rossa i els sòls rojos mediterranis***

*Terra rossa* és el terme italià amb què s'anomenen comunament els sòls rojos mediterranis. En sentit estricte es referia inicialment als sòls vermells sota clima mediterrani sobre roca calcària (Reifenberg, 1927), però posteriorment s'ha aplicat genèricament a tot tipus de sòls mediterranis de color vermell, amb textures argiloses

o llimoses i bon drenatge, normalment amb valors de pH neutres i desenvolupats sobre qualsevol tipus de material, encara que se'n troben moltes variants (Yaalon, 1997). De fet cap dels dos termes (*terra rossa* o *sòls rojos mediterranis*) s'utilitza en les taxonomies internacionals de sòls i, per tant, estan poc fixats, però el seu ús està generalitzat i es fan servir de forma col·loquial.

Llur color és la característica més notable (matisos entre 5YR i 10R de la taula Munsell), i reflecteix la intensitat del procés de rubefacció, un procés de formació del sòl que condueix a un predomini de l'hematites, que és un òxid de ferro deshidratat ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) sobre la goethita ( $\text{FeO}_2\text{H}$ ) (Schwertmann i Taylor, 1989; Bech *et al.*, 1997). La deshidratació dels òxids de ferro només tindria lloc en un clima amb una estació seca i càlida, pròpia dels climes mediterranis, i requereix que el material estigui descarbonatat, és a dir, que s'hagin dissolt i eliminat els carbonats del perfil del sòl en cas que el material parental sigui calcari. Aquest darrer procés seria causat per l'excés de precipitació durant els mesos més freds, que permetria el rentatge parcial dels carbonats del sòl i llur precipitació en horitzons més profunds (Yaalon, 1997), com ocorre en els règims d'humitat xèrics. Degut al fet que és un procés lent, cal que el material original estigui en una posició prou estable perquè tingui lloc la seva descarbonatació i rubefacció, de manera que la majoria de sòls rojos s'han datat en diferents estadis isotòpics marins (MIS, de l'anglès *marine isotopic stage*) del Plistocè, i no es coneixen registres de sòls rojos durant l'Holocè (darrers onze mil set-cents anys) (Zielhofer *et al.*, 2009). La particularitat de la conca mediterrània, on durant les glaciacions la coberta de gel no va ser regional, al contrari del que va ocórrer en latituds més elevades, fa que aquests trets s'hagin conservat fins a l'actualitat.

Un altre tret característic dels sòls rojos és la il·lumiació (mobilització) d'argila, que té lloc quan el material del sòl està descarbonatat i es donen les condicions per a la dispersió i translocació descendent d'argila de forma col·loidal, i que també requereix un excés de precipitació respecte a l'evapotranspiració. La il·lumiació d'argila es manifesta, en els horitzons on s'acumula, amb revestiments d'argila al voltant de porus, cares d'agregats o grans de sorra. Aquests revestiments d'argila poden observar-se al camp amb l'ajut d'una lupa, però la prova diagnòstica és en làmina prima observada al microscopi, on s'identifiquen per revestiments òpticament anisotròpics (birefringents), que es deuen a l'orientació de les partícules d'argila paral·lela a la superfície que recobreixen. El resultat d'aquests processos fa que la seqüència modal d'horitzons del perfil d'una *terra rossa* sigui A-Bt-R. L'horitzó A és el format en superfície. L'horitzó Bt és en aquest cas l'horitzó rubefactat i descarbonatat amb acumulació d'argila, sovint discontinu, que omple les esquerdes de la roca, i l'horitzó R (o 2R) és la roca calcària. Si el material parental ja no té carbonats (per exemple, en els sòls sobre materials derivats de roques ígnies), el procés pot anar més ràpid, tal com ocorre a la Cerdanya, si es comparen els sòls amb carbonats i sense, a banda i banda del riu Segre (Poch, Simó i Boixadera, 2013).

L'origen del material originari dels sòls rojos s'ha explicat clàssicament com el residu de la dissolució de la roca calcària i altres materials carbonatats de la roca subjacent (Wei *et al.*, 2013), però hi ha també evidències de contribucions externes de partícules de vent o pluges de fang que s'han atribuït sovint a la pols dels deserts del Sàhara (Yaalon, 1997) i també a processos de substitució metasomàtica de calcita per argiles (Merino i Banerjee, 2008).

La micromorfologia dels sòls rojos no està tan estudiada com les seves propietats mineralògiques i químiques. Per il·lustrar les diferents tipologies dels sòls rojos, la taula 1 mostra alguns exemples de sòls rubefactats que tenen caracterització micromorfològica a Catalunya, que es comenten a continuació i que mostren la varietat de les condicions de formació.

TAULA 1  
Exemples d'horitzons rubefactats en sòls a Catalunya

Ubicació	Unitat de relleu / material originari	Edat de la unitat de relleu o del material (milers d'anys)	Horitzó genètic i fondària (cm)	Color dels horitzons rubefactats (Munsell, humit)	pH (H <sub>2</sub> O 1:2,5) horitzons rubefactats	Contingut de carbonat de calci (%)	Referència
Prades (Baix Camp)	Calcàries triàsiques	Sense determinar	2Bt 55/80-60/100	2,5YR 4/8	8,0	0	Boixadera i Poch, ed., 2008
L'Aldea (Baix Ebre)	Ventall al·luvial de l'Ebre (Plistocè inferior - Pliocè)	~ 2.500	2Bt 27-104	2,5YR 3/6	No determinat	0	Boixadera i Poch, ed., 2008
Els Aspres (Alt Empordà)	Ventall al·luvial del riu Fluvià (Pliocè)	> 2.500	2Bt 33-55	7,5YR 5/8	6,9	0	Boixadera, Antúnez i Poch, 2016
Torre del Remei (la Cerdanya)	Unitat glaciofluvial T4	781	2Btg2 95-160	No determinat (excés d'elements grossos)	6,6	0	Poch, Simó i Boixadera, 2013
Vilamitjana - els Nerets (Pallars Jussà)	Ventall al·luvial / edafosediment derivat dels gresos d'Areny	> 350	Bt2 42-75	2,5YR 4/8	6,7	0	Poch <i>et al.</i> , 2019
La Serra d'Almos - Mas d'Alerany (Ribera d'Ebre)	Loess calcari	125	3Btk3 110-164	2,5YR 5/4	8,8	24	Plata <i>et al.</i> , 2021
Ventalló (Alt Empordà)	Terrassa plioceana del riu Fluvià	30	2Bt 48/80-99	2,5YR 4/6	8,0	1,5	Boixadera, Antúnez i Poch, 2016

FONT: Elaboració pròpia.

Tot i poder-se anomenar *terra rossa* pel seu color, els processos que han conduït a la formació d'aquests sòls tal com els veiem ara són molt variats. L'exemple de sòl a la taula 1 que correspon al concepte central (original) de *terra rossa* és el de Prades, sobre unes calcàries triàsiques. La microfotografia del seu horitzó 2Bt de la figura 3a no evidencia cap revestiment d'argila al voltant de porus o de grans de sorra que demostrarien el procés d'illuviació d'argila, però sí que es mostren els colors vermells deguts a l'hematites, que emmascaren qualsevol anisotropia dels elements de la fracció fina (micromassa) del sòl. Probablement aquesta darrera conté argiles residuals o neoformades que no han pogut ser mobilitzades. Per contra, en el ventall al·luvial de l'Ebre a l'entrada del delta (l'Aldea), sí que s'identifiquen revestiments d'argila associats a superfícies de porus i esquerdes de fragments de roca (figures 3b i 3c), la qual cosa faria evident el procés de dispersió i mobilització d'argila sota un clima bastant més plujós que l'actual, prèvia descarbonatació dels sediments (carbonatats) del riu Ebre.

Altres sòls desenvolupats en les superfícies més antigues (els Aspres i Vilamitjana - els Nerets) estan també descarbonatats tal com els anteriors, o bé ja estan desenvolupats sobre materials sense carbonats (Torre del Remei) i s'han acidificat lleugerament. En làmina prima el procés principal que s'observa al perfil de Vilamitjana - els Nerets és la translocació d'argila de forma dispersa i formació de revestiments microlaminats (figura 4a), mentre que als Aspres l'edat del perfil ha permès la formació d'argiles expansibles (de tipus esmectític) que probablement han trencat qualsevol revestiment anterior per argil·loturbació, i el que s'observa més clarament són cares de pressió al voltant dels elements grossos (figura 4b). En el perfil de Torre del Remei, sobre materials granítics fluvioglacials, el tret més rellevant és la formació d'argila a partir de la meteorització de minerals primaris (principalment miques i plagiòclasis càlciques) que també alliberen ferro i la seva illuviació a través del perfil (figura 4c).

Els dos darrers exemples d'horitzons, de la Ribera d'Ebre i de l'Empordà, pertanyen a perfils complexos que han sofert aportacions de sediments calcaris en superfície, i que o bé s'han anat rentant i acumulant en profunditat, recarbonatant els sòls rojos previs que recobreixen, o bé un cop es descarbonaten en períodes humits i es mobilitzen les argiles, aquestes recobreixen els materials carbonatats que es troben a sota, la qual cosa es mostra a la figura 5. Aquesta superposició de trets en principi incompatibles (normalment l'argila no es dispersa en presència de calci en ser un ió floculant) és precisament la que permet determinar la seqüència de processos (i, en conseqüència, la successió de climes i d'ambients) que han sofert els perfils. La figura 6 il·lustra com es poden identificar aquests processos a escala de camp.

Aquesta mostra d'horitzons de sòls rojos posa de manifest la complexitat dels processos genètics involucrats: formació d'argiles 2:1 d'espaiament variable, des-



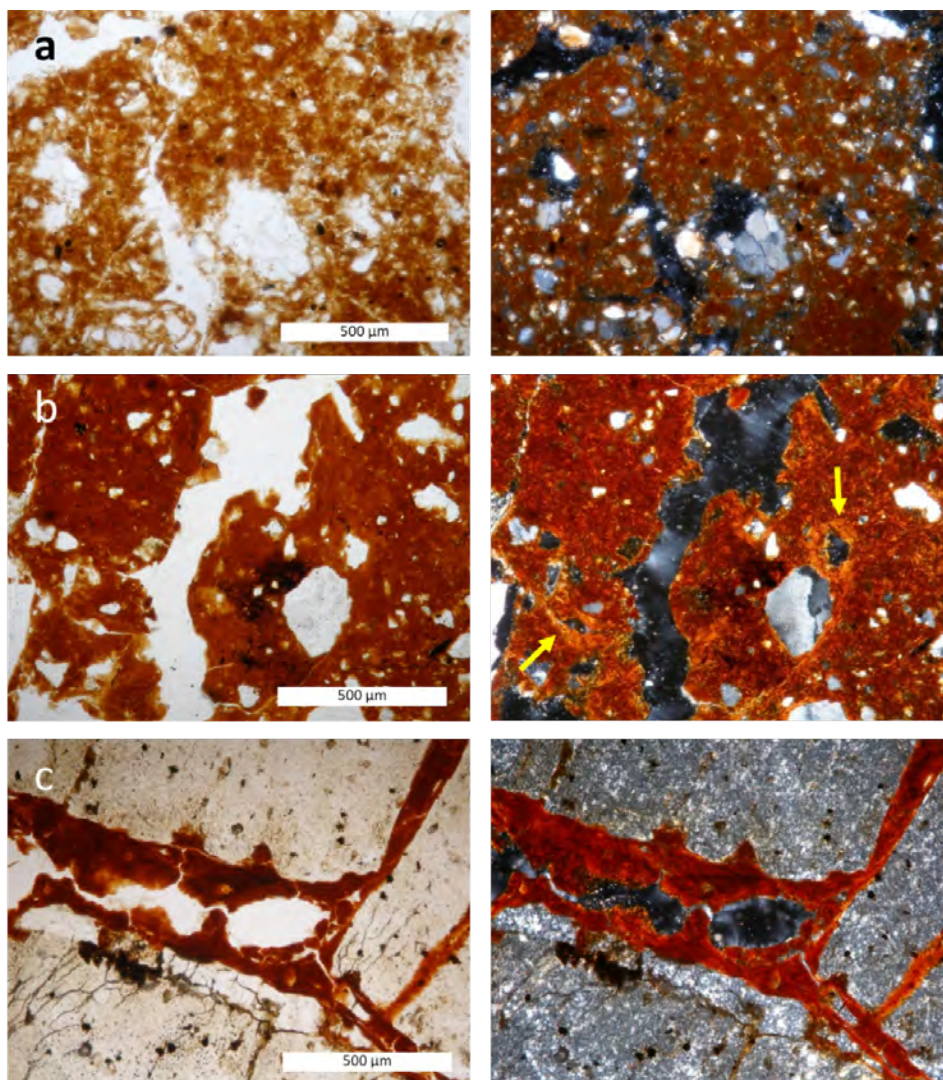


FIGURA 3. Microfotografies. *a)* Horitzó 2Bt del perfil de Prades. La micromassa és una barreja rogenca d'argila i òxids de ferro. Les puntuacions opaques són nòduls d'òxids de ferro i els cristalls blancs i grisos són sorres fines de quars. *b)* i *c)* Horitzó 2Bt del perfil de l'Aldea. La micromassa és una barreja rogenca d'argila i òxids de ferro. Les puntuacions opaques són nòduls d'òxids de ferro i manganès i els cristalls blancs i grisos són sorres fines de quars. S'observen revestiments d'argila microlaminada (anisotròpica) al voltant de porus (fletxes) i d'esquerdes de grans de quars. A l'esquerra: polaritzadors paral·lels; a la dreta: polaritzadors encreuats.

FONT: Elaboració pròpia.

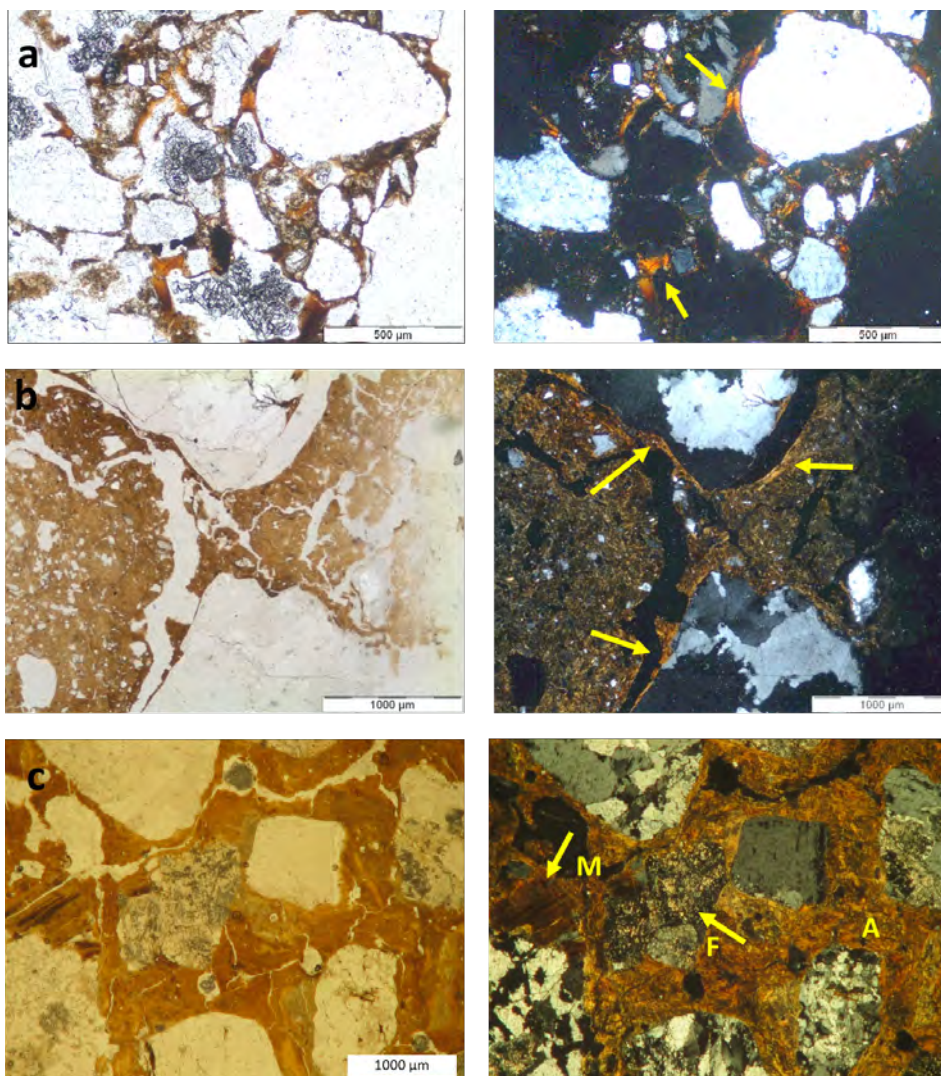


FIGURA 4. Microfotografies. *a)* Horitzó Bt2 del perfil de Vilamitjana - els Nerets. És un horitzó molt sorrenc i entre els grans de sorra de quars hi ha revestiments d'argila illuviada de color taronja (fletxes), que mostren anisotropia en polaritzadors encreuats per l'orientació de les partícules. *b)* Horitzó 2Bt del perfil dels Aspres. El color no és tan vermell com en els altres perfils, i el material fi conté argiles esmectíques que durant l'estació humida s'inflen i pressionen els grans de sorra i cares d'agregats, s'orienten i formen estries visibles en polaritzadors encreuats (fletxes). *c)* Horitzó 2Btg2 del perfil de Torre del Remei. S'observa l'alteració de minerals com feldspats (F) i miques (M) i revestiments d'argila illuviada (A) derivada d'aquests, que omple tots els buits al voltant dels elements grossos. A l'esquerra: polaritzadors paral·lels; a la dreta: polaritzadors encreuats.  
 FONT: Elaboració pròpia.



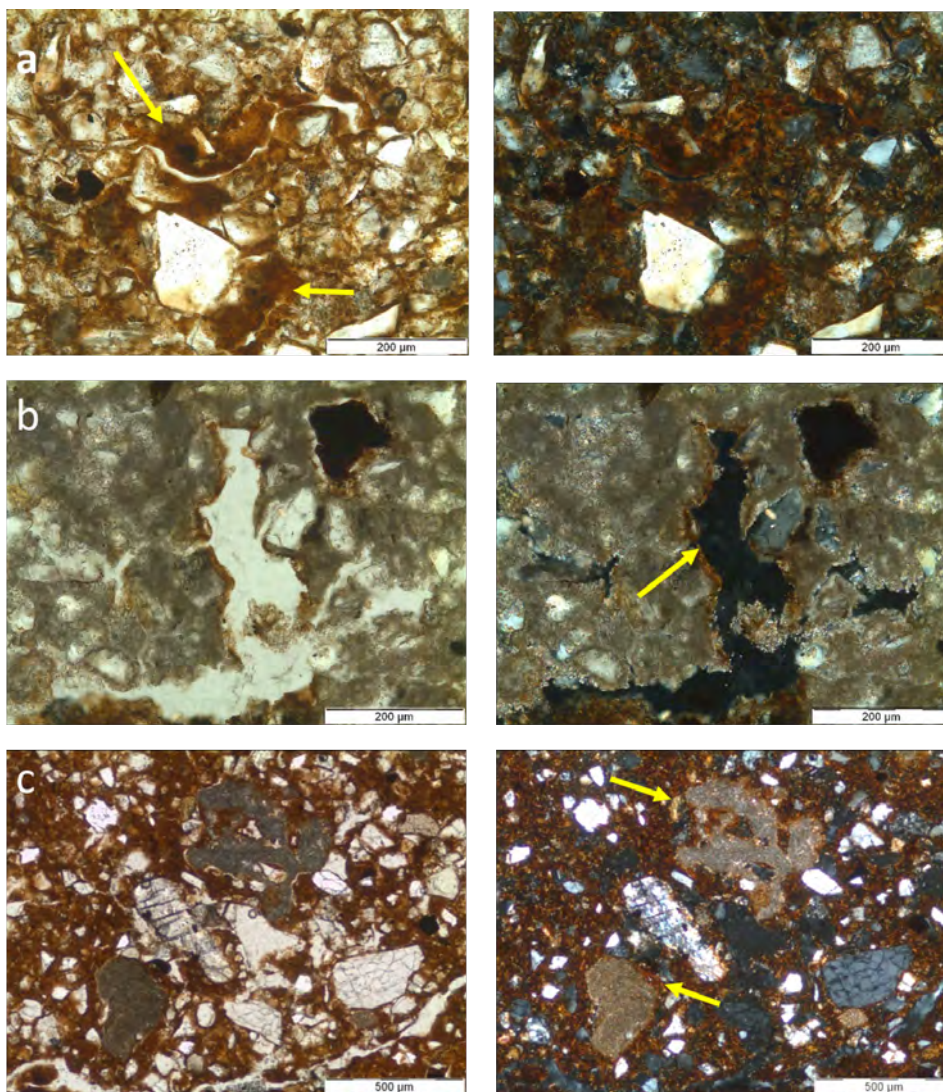


FIGURA 5. Microfotografies. *a) i b)* Horitzó 3Btk3 del perfil de la Serra d'Almos - Mas d'Alerany, amb revestiments i rebliments d'argila de color taronja en porus, fins i tot a l'interior de nòduls de carbonats (fletxes). *c)* Horitzó 2Bt del perfil de Ventalló. El material fi és de nou una barreja d'argila, llim fi i òxids de ferro. Els revestiments d'argila (fletxes) cobreixen nòduls de carbonats (grisos). A l'esquerra: polaritzadors paral·lels; a la dreta: polaritzadors encreuats.  
 FONT: Elaboració pròpia.

hidratació d'òxids de ferro, dispersió i il·luviació d'argila, i rentatge/acumulació de carbonats. La intensitat dels processos en els horitzons que s'han mostrat està en funció del temps (a més edat, més rubefacció, més grau de descarbonatació i, fins i tot, d'acidificació), del tipus de material parental (en materials sense carbonats la formació i la il·luviació d'argila ocorren més ràpidament) i, molt probablement, de la variabilitat regional del paleoclima, que fa que s'observi rubefacció en el perfil més jove dels exposats (Ventalló), en una àrea costanera, previsiblement més plujosa que les anteriors.

En funció de les característiques del material original i de l'alternança de condicions climàtiques al llarg del quaternari, se sobreposaran o no els trets que resulten de la carbonatació (durant períodes secs normalment agradatius, on hi ha aportacions de materials calcaris en superfície) amb la il·luviació d'argila (durant períodes humits i càlids que dissolen els carbonats i permeten la dispersió de les argiles). També mostra que les (micro)morfologies finals no resulten només de processos lineals i graduals, sinó també de fenòmens catastròfics com, per exemple, avingudes o moviments de massa, que queden com a memòria del sòl.

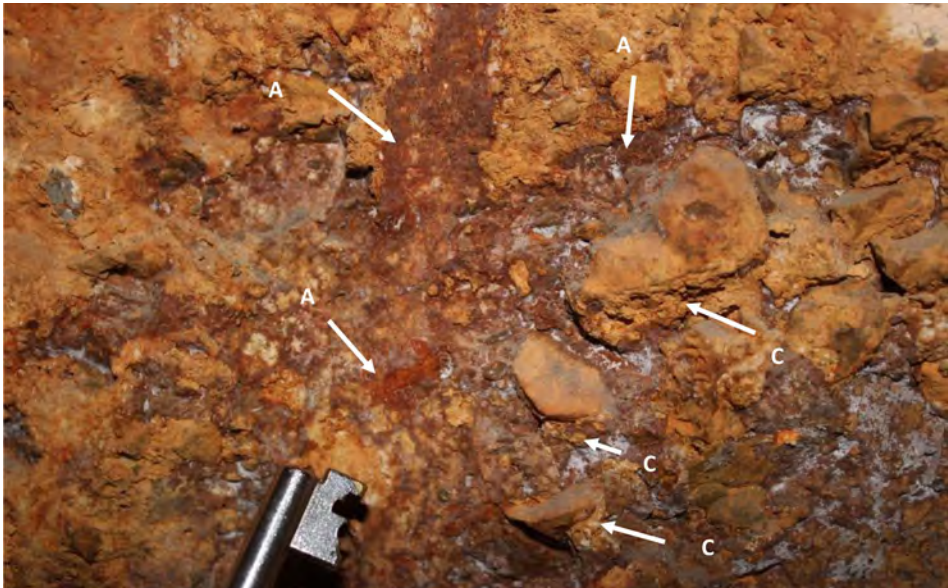


FIGURA 6. Rubefacció i translocació d'argila (A) que se superposa a unes graves amb recobriments (penjants) de carbonat càlcic (C), tal com es veu al Palau de la Música a Barcelona (parets cruës de les escales dels camerinos de la Sala Petita). Mostra la cronologia relativa o seqüència dels processos: un ambient àrid amb precipitació de carbonats seguit d'un de càlid i humit amb formació i il·luviació (rentatge) d'argila i de rubefacció. Correspondrien a una superfície plistocena amb origen a la serralada Litoral.

FONT: Elaboració pròpia.

### 3.2. Les Garrigues que van veure Indíbil i Mandoni

La comarca de les Garrigues està ocupada en la majoria de la seva superfície per bancals de pedra seca, que sostenen els cultius d'oliveres i ametllers de secà. Són especialment freqüents a les parts més altes de la comarca, properes a la serra de la Llena. Segons Martín i Serra (1991), aquests bancals daten del segle XVIII, vinculats a l'expansió de cultiu de l'olivera. El duc de Medinaceli va promoure la plantació d'oliveres de la varietat arbequina (importada de Palestina) a les Garrigues, la qual cosa va comportar l'abancament generalitzat del territori i un canvi sobtat de l'ús del sòl.

Les prospeccions de sòls a les Garrigues, en especial les realitzades arran de la posada en reg amb el canal Segarra-Garrigues (Porta i Herrero, 1983; Carrillo *et al.*, 1998; IGC-DAAM-ICC, 2011), van detectar, de manera sistemàtica, un tipus particular d'horitzó enterrat Ahb, amb més matèria orgànica (continguts entre 1,7-3,3 % en pes), més fosc (una unitat d'intensitat i una de llüïssor més baixes) i amb una estructura grumollosa molt desenvolupada i forta, en comparació amb els sòls actuals (figura 7).

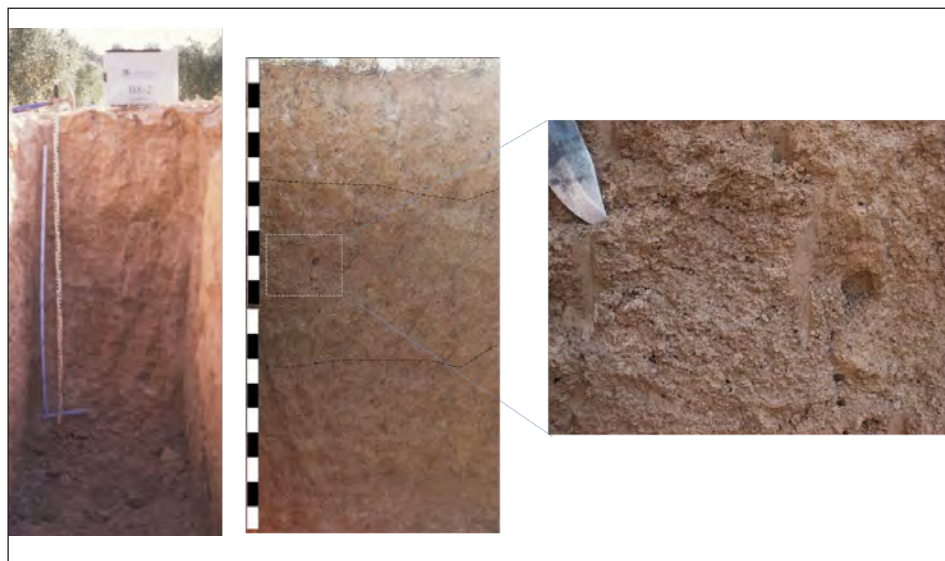


FIGURA 7. Horitzó Ahb enterrat del perfil el Soleràs B8-2 (les Garrigues) (entre línies discontinües) amb una estructura grumollosa deguda a freqüents galeries i canals farcits per l'activitat de la fauna edàfica; de fet, el 100 % de l'horitzó està bioturbat.

FONT: Elaboració pròpia.



El conjunt de trets que fan particulars aquests horitzons enterrats a la comarca on es troben és el gruix, el contingut de matèria orgànica uniforme en tot el volum, el color fosc associat i l'estructura grumollosa, que són característiques pròpies d'un horitzó A (format en superfície), freqüent, d'altra banda, en zones temperades, amb climes clarament més humits que el de les Garrigues, i sota una coberta densa de gramínies. Aquests es classifiquen actualment com a epipèdons mòl·lics. Per llur elevada fertilitat química i física es consideren els horitzons superficials dels millors sòls del món per a la producció agrícola. Actualment es troben a la superfície dels sòls negres (txernozems) de les estepes russes, al cinturó de blat de moro dels Estats Units o a la pampa argentina, per la qual cosa no és exagerat considerar-los el graner de bona part de la humanitat.

La micromorfologia dels horitzons enterrats a les Garrigues mostra, per una banda, l'estructura en agregats granulars porosos deguda a l'activitat de la fauna i, per altra banda, fragments de crostes superficials (figures 8a i 8b), revestiments de llim en les parts inferiors dels porus (figures 8c i 8d) i freqüents fragments de carbó vegetal (figures 8e i 8f). Llevat de l'estructura granular porosa, la resta de trets són deguts al moviment de terres en la fabricació dels bancals: l'estassada i la crema (carbons) i l'eliminació de la vegetació deixen la superfície del sòl nua; els moviments de terres alteren l'estructura de l'horitzó superficial i el deixen a mercè de l'impacte de les gotes de pluja que en disgreguen els materials, els posen en suspensió i formen les crostes superficials, mentre que els revestiments de llim es formen per percolació sobtada de l'aigua carregada amb aquests materials en suspensió a través del sòl (Boixadera *et al.*, 2016).

Les datacions de carboni 14 ( $^{14}\text{C}$ ) de fragments de carbons extrets dels horitzons enterrats són coherents amb els registres històrics de l'abancament de les Garrigues (segles XVII-XIX); mentre que les de la fracció orgànica (humus) dels mateixos horitzons tenen edats més antigues, entre els segles III-V, i una puntualment dins dels dos-cents anys aC. Cal dir que les edats de l'humus, com a reservori dinàmic que és, poden interpretar-se com el moment de la darrera aportació de matèria orgànica al sòl, per la qual cosa l'existència d'aquests horitzons es remunta probablement al doble de l'edat calibrada, durant aproximadament els darrers quatre mil anys (Boixadera *et al.*, 2016). Aquestes dades ens indiquen que la coberta edàfica que va fer abancalar el duc de Medinaceli tenia un horitzó superficial molt fosc, que no es corresponia al clima d'aleshores (similar a l'actual). Es tractaria, doncs, d'horitzons superficials de sòls relictos, que van restar a la superfície com a mínim durant uns tres mil anys, però amb indicis que podrien ser molt més antics, per la identificació d'horitzons amb característiques similars en jaciments arqueològics (abrics) d'àrees properes (Bergadà *et al.*, 2016).

L'ocupació humana al principi del període datat correspon a tribus ilergetes, documentada a bastament al Pla d'Urgell, el Segrià i les Garrigues. Un dels jaciments

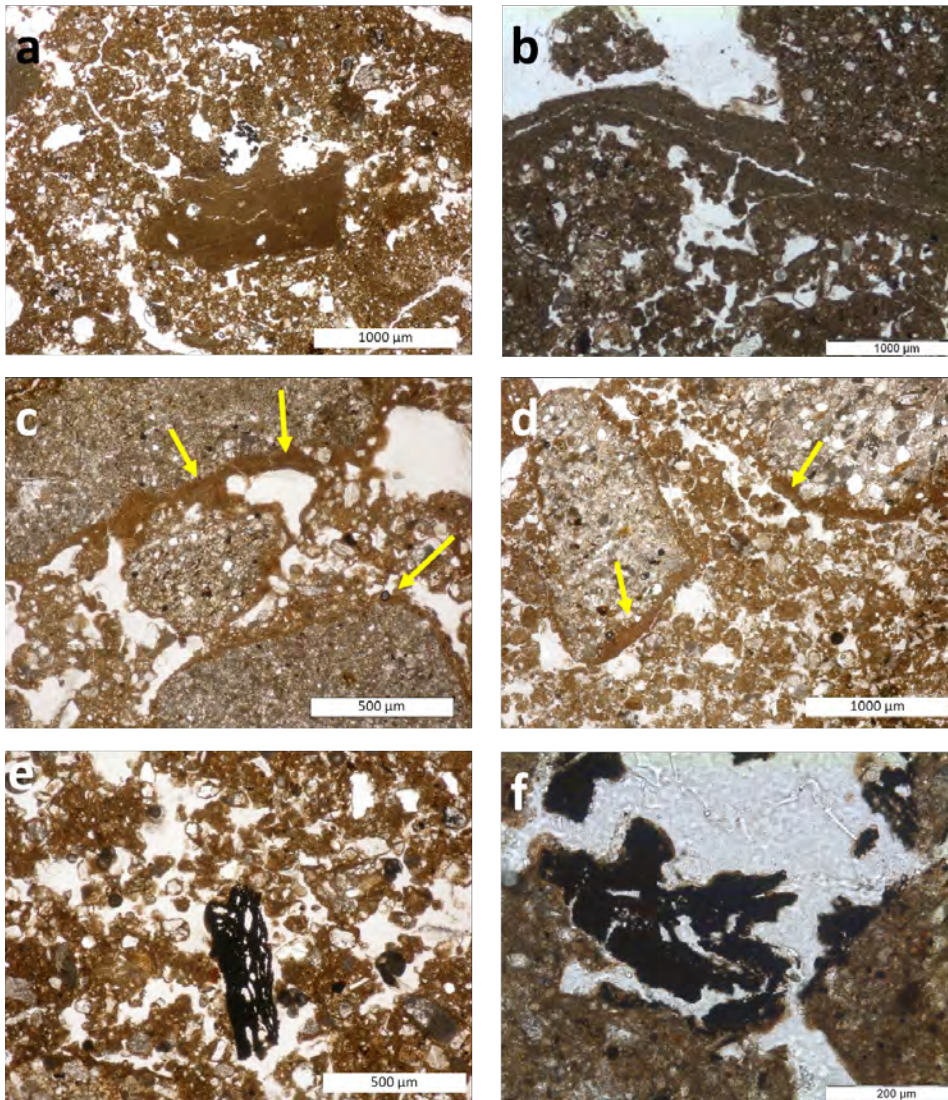


FIGURA 8. Trets micromorfològics en horitzons Ahb dels perfils de la Granadella i el Soleràs (les Garrigues). *a*) i *b*) Fragments de crostes superficials. *c*) i *d*) Revestiments de llim al voltant de porus i de fragments de gresos calcaris (fletxes). *e*) i *f*) Carbons vegetals. Especialment en les imatges *a*), *b*), *d*) i *e*) es pot observar la microestructura granular deguda a l'activitat de la fauna. Imatges en polaritzadors paral·lels.

FONT: Elaboració pròpia.

més interessants és la fortalesa ibera dels Vilars, a Arbeca, que va ser construïda a mitjan segle VIII i abandonada el tercer quart del segle IV a. de la n. e., i que ha estat estudiada pel Departament d'Història de la Universitat de Lleida (Junyent *et al.*, 2009, i Junyent, Poch i Balasch, 2012). La ubicació en un pla, en lloc d'un tossal, i la presència d'un fossat i d'un enorme pou cisterna al bell mig del poblat van ser qüestions a les quals calia trobar una explicació durant les primeres fases de l'excavació.

Malgrat haver estat alterats pels anivellaments i drenatges de la posada en reg (els Vilars es troba als marges de la zona regable pel canal d'Urgell), els sòls dels voltants, desenvolupats sobre un petit con de dejecció d'un torrent, no eren substancialment diferents dels actuals, i pot identificar-s'hi encara la xarxa de drenatge original. La prospecció dels sòls al voltant de la fortalesa (Poch i Balasch, 2003) indica que el nivell del sòl abans de l'abandonament de la fortalesa devia estar entre un metre i un metre i mig per sota del nivell actual, perquè s'identifiquen horitzons enterrats a aquesta fondària en l'àrea d'influència del con de dejecció. Aquests horitzons tenen continguts moderats de matèria orgànica, conserven la porositat deguda a l'activitat de la fauna i l'estructura dels horitzons superficials, hi són freqüents els carbons i fragments d'ossos, i s'hi identifiquen també revestiments de llim transportat per suspensió, fet que evidencia de nou la seva alteració per les activitats que s'hi duïen a terme i pel maneig del sòl (figura 9).

L'inventari de les llavors, carbons vegetals i restes animals trobats al jaciment permet deduir els tipus de vegetació i els diferents usos del sòl d'aleshores (pastures, agricultura i boscos de ribera) (Alonso, 1999), i a partir de la prospecció anterior i dels mapes de sòls 1:25.000 de l'àrea regable pels canals d'Urgell (Herrero *et al.*, 1993) pel marge oest del canal d'Urgell i l'àrea regable pel canal Segarra-Garrigues (REGSA-INARSA, 1997) pel marge est pot fer-se un exercici de paleoavaluació de sòls (FAO, 1976), que ens permet fer una proposta de reconstrucció del paisatge de l'àrea circumdant (figura 10). La ubicació de la fortalesa, segons aquest paleopaisatge, es troba prop d'un curs d'aigua, que permetia omplir el fossat i alimentar el pou cisterna per percolació a través de les graves del con de dejecció per sota del poblat (Poch, Junyent i Balasch, 2014). A més, és en un punt d'alta edafodiversitat, amb la qual cosa els seus habitants tenien, just sortint de les muralles fortificades, les pastures per als cavalls, els horts, els camps de cereals, el bosc de ribera i una vegetació estepària en un radi de 500 m i, per tant, podien optimitzar l'ús dels recursos del territori en un radi molt reduït. La hipotètica ubicació de la fortalesa dalt dels tossals del voltant, amb sòls pedregosos i poc profunds (petrocàlcids), hauria impedit l'accés a l'aigua i hauria obligat els seus habitants a desplaçar-se lluny per a obtenir els mateixos recursos (Junyent, Poch i Balasch, 2012).

L'anàlisi d'isòtops en restes orgàniques indica que, efectivament, la pluviometria durant aquell període era aproximadament un 20 % més elevada que l'actual (Voltas Velasco *et al.*, 2008). Malgrat que continuava sent un clima mediterrani



amb una estació seca, el règim d'humitat tindria una estació humida clara, amb excés d'aigua —a diferència del règim actual que es troba al límit entre el xèric i l'arídic—, la qual cosa explicaria la formació de l'horitzó mòl·lic que actualment trobem enterrat en alguns punts. El fet que no trobem aquest horitzó als voltants dels Vilars, ni tampoc enterrat, s'explica, a més de per l'edafodiversitat inherent de la comarca, per l'ús agrícola continuat amb diferents intensitats d'ús i sota un clima més àrid posterior, que hauria provocat la mineralització de la matèria orgànica que devia contenir aquest horitzó superficial. La seva conservació en alguns vessants de les Garrigues es deuria al fet que fins a l'abancament l'ús agrícola devia ser limitat pels pendents més elevats.

Finalment, caldria agrair al duc de Medinaceli l'abancament massiu que va permetre preservar aquests sòls negres enterrats, i també que sigui el responsable que en els nostres dies es produeixi a les Garrigues un dels millors olis del món.

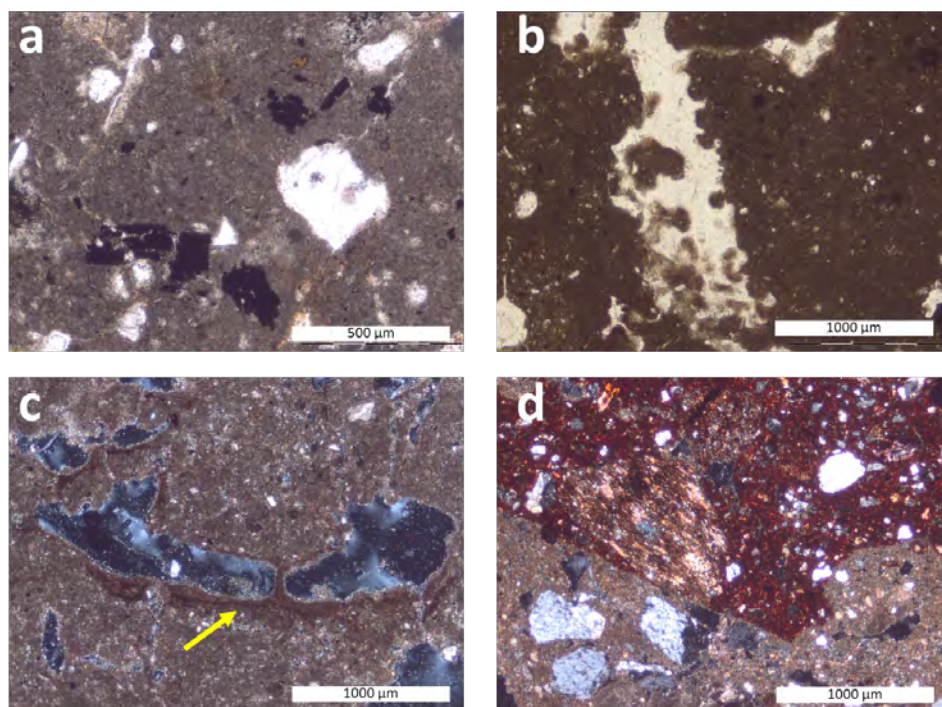


FIGURA 9. Trets micromorfològics en horitzons enterrats (Ab) al voltant de la fortalesa ibera dels Vilars (Arbeca). *a*) Fragments de carbons vegetals (pèdon 1). *b*) Canal de fauna farcit d'excrements (pèdon 4). *c*) Micropan (revestiment) de llim a la base d'un canal de fauna (fletxa) (pèdon 4). *d*) Fragment (rogenc) de terra cuita (maó i ceràmica) (pèdon 5). *a*) i *b*) Polaritzadors paral·lels; *c*) i *d*) polaritzadors encreuats.

FONT: Elaboració pròpia.



FIGURA 10. Reconstrucció del paleopaisatge als voltants de la fortalesa ibera dels Vilars (Arbeca). FONT: Elaboració pròpia sobre una base cartogràfica de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya.

### 3.3. *El paisatge antropològic precolombí als Llanos de Moxos (Bolívia)*

Els Llanos de Moxos, a Bolívia, estan ocupats per un dels aiguamolls més grans del món, amb una superfície d'uns 150.000 km<sup>2</sup> a l'Amazònia boliviana. La seva inaccessibilitat va evitar durant molts anys assentaments humans generalitzats, i només després de nombrosos intents els espanyols van colonitzar la zona a finals del segle XVII. A partir d'aleshores l'ús més comú ha estat la ramaderia extensiva, combinada amb l'agricultura de subsistència restringida a algunes zones.

És una zona gairebé plana (entre 200 m i 250 m d'altitud), lleugerament inclinada cap al nord, amb una amplada d'entre 300 km i 400 km. Està ocupada per sediments terciaris i quaternaris, al·luvials o fluviolacustres, de textura fina (argila i llim), sense pedregositat. La regió està travessada pel riu Mamoré i els seus afluents procedents dels Andes i les serralades externes, així com de l'escut brasiler al marge dret. Tots ells són afluents del riu Madeira, un dels principals afluents de l'Amazones. Aquest sistema és el responsable de les inundacions anuals dels Llanos en els tres i sis mesos que dura la temporada de pluges, a partir del desembre, quan tota la regió es converteix en un enorme llac. L'alçada mitjana de les inundacions és de 60 cm (Denevan, 1966), tot i que hi ha una gran variabilitat segons la ubicació i l'any.



La regió està coberta d'una vegetació de gramínies (*pampa*, segons la terminologia local) o sabanes inundades. Es poden trobar boscos al llarg dels rius i en zones altes. S'hi practica tradicionalment l'estassada i la crema, i l'agricultura itinerant.

Una de les particularitats d'aquesta regió són unes construccions en terra precolombines, que s'observen des de l'aire, amb disposicions en línies paral·leles, principalment com a camps elevats (*camellones*) o rases altes (*lomas*). Aquestes darreres s'utilitzen actualment per a l'agricultura i per als assentaments permanents. Aquestes obres de la terra es remunten fins a dos mil set-cents anys BP i s'han utilitzat durant segles.

Existeixen diverses teories sobre la finalitat d'aquestes construccions i en concret sobre el maneig agronòmic precolombí, el coneixement del qual seria útil per a plantejar actualment un maneig sostenible dels sòls de la regió. La comparació de les característiques dels sòls naturals amb les dels sòls antròpics, incloent-hi la micromorfologia, permet detectar quins són els trets diferencials deguts a les actuacions humanes que afavoreixen el seu ús i, per tant, poden ajudar a resoldre algunes d'aquestes qüestions (Boixadera *et al.*, 2003, 2019).

Les descripcions de camp i les anàlisis de quinze perfils de sòls naturals (no antropitzats) entre Trinidad i San Ignacio mostren que els sòls de textura més grossa (arenosa) es troben a prop del sistema fluvial actual o a les antigues zones de ribera, sovint sota bosc i amb textures francoargil·lollimoses dominants. Els sòls de textures més fines poden tenir fins a un 85 % d'argila i solen estar sota coberta de sabana. Es tracta majoritàriament de sòls àcids, però hi ha també sòls amb acumulació de carbonat càlcic en horitzons subsuperficials, i fins i tot sòls salins.

Els processos naturals de formació de sòls estan condicionats per l'hidromorfisme, causat per la inundació periòdica durant un període significatiu i la percolació de l'aigua dins dels porus del sòl amb molta energia (flux de vàlvula o de *bypass*). Els trets hidromòrfics en aquests sòls consisteixen en concrecions d'òxids de ferro i manganès amb límits difusos dins d'agregats, i recobriments de ferro que impregnen les parets dels porus combinats amb àrees de pèrdua de ferro. En classificació de sòls s'anomenen *característiques* o *trets redoximòrfics* i es formen a partir de la reducció, la translocació i l'oxidació de ferro i manganès, que en aquests ambients amb inundacions periòdiques són els dominants. Quan aquests òxids, que recobreixen les partícules del sòl i que els donen colors bruns o vermellosos, es redueixen químicament per esgotament de l'oxigen, les formes reduïdes passen a la solució de sòl i les partícules del sòl mostren un color gris, blanc o el del gra mineral sense recobrir. El ferro i manganès reduïts es poden tornar a oxidar tan aviat com trobin un microlloc adient com, per exemple, un porus amb entrada d'aire o una zona on no s'hagi esgotat l'oxigen (com ara l'interior d'un agregat sense activitat biològica). El resultat és un clapejat de colors vermellosos i bruns

alternat amb grisos, indicador de condicions d'anaerobiosi. Condicions de reducció més severes o continuades afectarien altres elements com el sofre (reducció a sulfurs) o, finalment, el carboni (reducció a metà).

L'estudi micromorfològic mostra diferents graus d'hidromorfisme, alguns d'ells associats al sistema de porus actual i d'altres com a paleotrets, sovint pertorbats per cares de lliscament actives degudes a la presència d'argiles expansibles (argilloturbació), que són les responsables de l'esquerdament del sòl durant l'estació seca. Els nòduls de calcita també estan presents en alguns sòls, així com diverses morfologies relacionades amb la mobilitat de la fracció fina, també degudes a les condicions de drenatge, com revestiments d'argila, d'argila i llim, i àrees de pèrdua (rentatge) d'argila, que en aquesta zona és de tipus il·lític i esmectític.

L'estudi detallat d'escandalls practicats en els sòls antròpics dels camps elevats i les rases altes mostra, en el camp, una alta variabilitat espacial —en pocs metres— de la distribució dels horitzons des dels canals fins a les parts altes, com poden ser perfils invertits per moviments de terres. Els canvis més importants respecte als sòls naturals són, tal com era previsible, una millora de les condicions de drenatge en les parts superiors, que en làmina prima es manifesten per trets redoximòrfics poc intensos en superfície, que es van accentuant en profunditat corresponent a horitzons amb períodes més llargs de saturació d'aigua (figura 11). La morfologia que ho indica, que segueix estats d'hidromorfisme creixent, presenta una escala aproximada com la següent: nòduls dins d'agregats, pèrdua de ferro i manganès al voltant de porus, increment d'àrees de pèrdua dins d'agregats, matriu reduïda i revestiments d'òxids al voltant dels porus, sovint concèntrics (Vepraskas, Lindbo i Stolt, 2018). L'absència de pirita (sulfur de ferro) en les làmines primes porta a pensar que la durada de la inundació no és suficient per a causar condicions reductores més severes.

A banda de la gradació dels nivells d'hidromorfisme en l'escala horitzontal i en la vertical, no hi ha cap altra evidència clara d'un maneig diferencial del sòl quant a addició d'esmenes, per l'absència quasi total de restes de materials al·lòctons com ossos, restes vegetals o carbons, que, per altra banda, són presents en altres sòls antròpics a Amèrica llatina com les *terras pretas do índio* (Arroyo-Kalin, 2017). Tampoc no hi ha evidències d'una fertilització continuada que es manifestaria per quantitats sistemàticament més elevades de fòsfor als horitzons superficials, ni d'un maneig diferencial dels sòls naturalment salins, o dels més àcids. En relació amb aquests darrers, cal dir també que les aigües que anualment inunden els Llanos contenen certa quantitat de minerals meteoritzables, els quals proveeixen un fons de cations bàsics que eviten una acidificació excessiva. Això ens porta a pensar que la finalitat d'aquestes construccions precolombines era bàsicament i senzillament crear un medi edàfic suficientment airejat per a l'ús agrícola,

per exemple, per al panís, del qual es troben cèl·lules silicificades (fitòlits) (Boixadera *et al.*, 2019).

En definitiva, les limitacions més importants d'aquests sòls per a l'ús agrícola a les quals s'havien d'enfrontar els pobles precolombins en aquesta zona serien, per tant, el mal drenatge i una acidesa moderada (no extrema) amb baixos continguts de nutrients, que explicarien la pràctica de l'estassada i la crema, i la construcció d'aquests camps elevats.

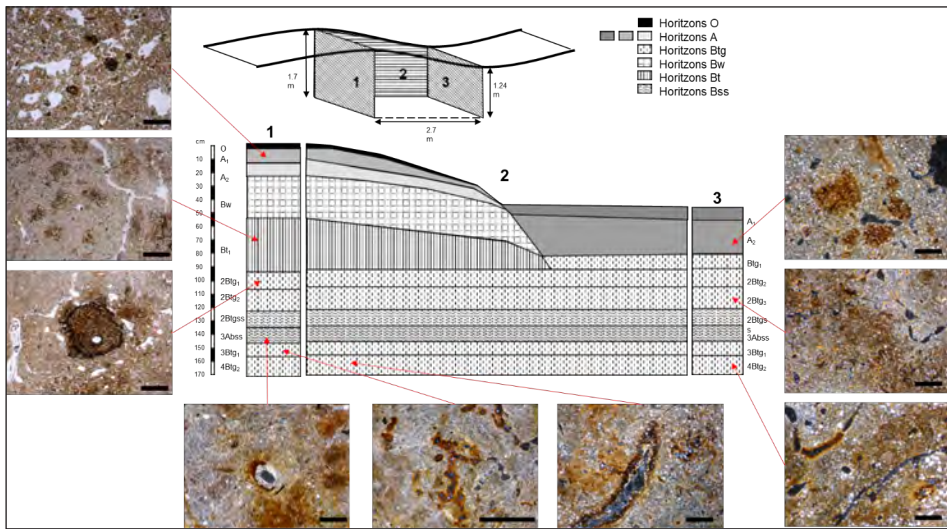


FIGURA 11. Esquema de l'escandall del perfil MOX-51, amb els tres redoximòrfics dels horitzons. S'observa que els dos horitzons superiors de la cara 1 (terrapiens) mostren només nòduls d'òxids de ferro, mentre que en els horitzons inferiors hi ha revestiments de ferro al voltant de porus i també trets d'empobriment, característics d'una matriu en estat de reducció durant llargs períodes de l'any. En la cara 3 (canal), l'horitzó A és el més ben drenat, mentre que en els dos inferiors, a més dels trets d'empobriment de ferro, s'hi veuen revestiments d'argila il·lumiada al llarg dels porus.

Llargada de l'escala (barra negra): 1 mm. Les tres imatges de l'esquerra s'han pres en polaritzadors paral·lels; la resta, en polaritzadors encreuats.

FONT: Modificat de Boixadera *et al.*, 2019.

#### 4. A TALL DE CONCLUSIONS

Paso mucho tiempo ante el microscopio. Y a cada paso redescubro una verdad conocida desde la infancia, a saber, que cuanto más se profundiza en el microcosmos más se encuentra la misma complejidad que en el macrocosmos. [...] Sucede como en un bosque: cuanto más te adentras en él, más lejano parece el final y aparecen nuevos troncos que antes estaban ocultos a la vista. Las líneas paralelas no se encuentran nunca: tal es la generalización del mundo que nos es accesible; lo complejo no es el *posterius* lógico de lo sencillo, sino que es inseparable de él, pues a él se une en el concepto de todo. El todo, por tanto, es tan sencillo como complejo, y tan complejo como sencillo. «El todo es antes que sus partes» (ontológicamente antes), pero no existe sin complejidad, es decir, sin partes. Y las partes no existen sin el todo, es decir, simplemente como tales.

Pável V. FLORENSKI (1882-1937), *Cartas de la prisión y de los campos*, 2020.

La memòria dels sòls, a més de poder-se tractar des d'un punt de vista filosòfic, segueix els principis i paradigmes de la ciència del sòl i, per tant, el seu estudi aporta coneixements sobre canvis ambientals en el passat. Els exemples que s'han mostrat abasten intervals de temps des de molt llargs (milions a centenars de milers d'anys) fins a molt curts (centenars d'anys), per la qual cosa els indicadors edàfics de canvi i que reflecteixen les condicions ambientals del passat són els que s'adapten a cadascun d'aquests períodes. En els períodes més llargs són la descarbonatació, meteorització de minerals, formació d'argiles i d'òxids de ferro i il·luciació d'argila (sòls rojos), mentre que en els més curts, ja amb influència antròpica, són el desenvolupament diferencial de trets redoximòrfics (exemple dels Llanos de Moxos), o la preservació de matèria orgànica i estructura (bancals de les Garrigues). Les variacions que s'observen en els indicadors informen sobre la diversitat regional dels factors formadors del sòl (clima, material parental, relleu, vegetació i ús del sòl i acció humana) i, per tant, són un punt de partida molt valuós per a poder dur a terme anàlisis més detallades.

L'edafologia és una de les ciències més joves, a cavall entre les ciències de la terra i les ciències de la vida. Només cal adonar-se que els sistemes de classificació de sòls d'ús més generalitzat tenen poc més de cinquanta anys i que els mapes i les bases de dades a escales detallades existeixen només en aquells països o regions que s'han adonat de la seva utilitat en l'ordenació del territori, en ser un recurs essencial per a la sobirania alimentària i per a altres serveis ecosistèmics. Ja al segle xv, Leonardo Da Vinci es lamentava que coneixem més les estrelles sobre els nostres caps que el sòl que tenim sota els nostres peus. No és d'estranyar, doncs, que, comparat amb les altres ciències, el seu cos de coneixement sigui encara incomplet, com ho evidencien les contínues revisions i actualitzacions dels sistemes de classificació de

sòls a mesura que es van coneixent més sòls i els nous àmbits que es van obrint, com la micromorfologia o la nanotecnologia aplicada als sòls, entre molts d'altres. Val a dir que la cartografia moderna dels sòls de Catalunya s'inicia a la dècada del 1980 amb les accions del Departament d'Agricultura de la Generalitat de Catalunya i, posteriorment, de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. La micromorfologia de sòls, com a tècnica d'estudi, és encara més recent: el primer manual de descripció data del 1985, per tant, la base de coneixement, que equivaldria a l'anatomia animal o fisiologia vegetal en altres disciplines, és encara incompleta per a molts tipus de sòls i processos edàfics, sobretot per a aquells que es troben sota condicions més extremes.

En el context de la tendència de les publicacions científiques actuals, les anàlisis morfològiques descriptives, els mapes i els atles no es consideren obres d'impacte, si no és que s'hi incorpora alguna anàlisi quantitativa o morfomètrica. Malgrat això, aquestes darreres perden significat sense la descripció i la comprensió del que s'està analitzant. La complexitat dels sistemes edàfics, que es caracteritzen precisament per llur variabilitat espacial, no es pot abordar sense conèixer l'arquitectura dels seus components, és a dir, la relació espacial a diferents escales, que en determina la funcionalitat i dinàmica en el temps, i que en un inici és simplement descriptiva.

Els exemples que he mostrat serien, per tant, un pas previ imprescindible, per exemple, en la quantificació de la il·lumiació d'argila o del volum de sòl bioturbat per anàlisi d'imatge; en l'anàlisi dels diferents estats d'hidratació dels òxids de ferro; en la selecció d'horitzons per la datació de matèria orgànica o de carbons; en l'elecció dels millors indicadors de la porositat per avaluar la qualitat del sòl, o senzillament en el plantejament què val la pena investigar. També he mostrat que la micromorfologia, combinada amb altres tècniques d'estudi de sòls, permet inferir condicions ambientals passades, i, per tant, és una eina potent per a preveure com podria evolucionar la coberta edàfica en un escenari de canvi climàtic o, fins i tot, per dissenyar estratègies d'adaptació. I sense que calgui buscar més raons, com seria també el gaudi d'observar aquestes noves imatges desconegudes fins ara, l'ampliació del coneixement dels sòls, com en qualsevol ciència natural, és ja un objectiu en ell mateix, suficient per a justificar-ne l'estudi.

## **AGRAÏMENTS**

Durant la meva trajectòria acadèmica he tingut la immensa sort de comptar amb excel·lents professors, excel·lents col·legues i excel·lents estudiants, sense els quals res del que he fet s'hauria pogut dur a terme. La meva admissió com a membre numerària de l'Institut d'Estudis Catalans no m'honora només a mi, sinó també a totes aquestes persones. El treball que he presentat és una compila-

ció d'investigacions diverses en col·laboració amb algunes d'elles, en el marc del Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl de la Universitat de Lleida. Vull donar les gràcies a en Jaume Porta, membre proponent de l'Institut d'Estudis Catalans, que em va despertar el cuc de l'edafologia i que sempre m'ha esperonat de manera incondicional a avançar en el coneixement. Gràcies a Georges Stoops; la saviesa sempre és humil. Gràcies a en Jaume Boixadera, a qui dec el que sé veure i interpretar al camp i a l'hora de desxifrar dades. Gràcies a Carles Balasch, Rafael Rodríguez, Montserrat Antúnez i a la resta de professors, companys i estudiants, els noms dels quals seria llarg d'esmentar però no per això menys importants, amb qui he après a pensar, analitzar i discutir i, per tant, els dec el que sé.

Finalment, dono gràcies als pares, Maria i Jordi. Herois d'una generació als quals mai no agraiem prou el que els devem. Els dec el que soc.

## REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- ALONSO, N. (1999). *De la llavor a la farina: Els processos agrícoles protohistòrics a la Catalunya occidental*. Lattes: CNRS. (Monographies d'Archéologie Méditerranéenne; 4)
- ARROYO-KALIN, M. (2017). «Amazonian dark earths». A: NICOSIA, C.; STOOPS, G. (ed.). *Archaeological soil and sediment micromorphology*. Nova York: Wiley, p. 345-357.
- BECH, J.; RUSTULLET, J.; GARRIGÓ, J.; TOBIAS, F. J.; MARTÍNEZ, Z. (1997). «The iron content of some red Mediterranean soils from northeast Spain and its pedogenic significance». *Catena*, vol. 28, núm. 3-4, p. 211-229.
- BERGADÀ, M.; POCH, R. M.; GARCÍA-ARGÜELLES, P.; NADAL, J.; FULLOLA, J. M. (2016). «Buried A horizons in Final Upper Palaeolithic rockshelters in the middle course of the Montsant river, NE Iberia: Anthropogenic and environmental implications». A: *15th International Conference on Soil Micromorphology. Book of abstracts* (Ciutat de Mèxic, 28 novembre - 4 desembre), p. 99-100.
- BOIXADERA, J.; ANTÚNEZ, M.; POCH, R. M. (2016). «Soil - landscape relationships in the Empordà basin (Catalonia, NE Iberian Peninsula)». *Spanish Journal of Soil Science*, vol. 6, núm. 3, p. 176-201.
- BOIXADERA, J.; ESTEBAN, I.; ALBERT, R. M.; POCH, R. M. (2019). «Anthropogenic soils from Llanos de Moxos (Bolivia): Soils from pre-Columbian raised fields». *Catena*, vol. 172, p. 21-39.
- BOIXADERA, J.; POCH, R. M. (ed.) (2008). *Transcatalonia N-S: Guía de excursión de edafología*. Lleida: Universitat de Lleida. Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl: Generalitat de Catalunya. Departament d'Agricultura, Alimentació i Acció Rural. Secció d'Avaluació de Recursos Agraris.
- BOIXADERA, J.; POCH, R. M.; GARCÍA-GONZÁLEZ, M. T.; VIZCAYNO, M. (2003). «Hydro-morphic and clay-related processes in soils from the Llanos de Moxos (northern Bolivia)». *Catena*, vol. 54, núm. 3, p. 403-424.
- BOIXADERA, J.; POCH, R. M.; LOWICK, S.; BALASCH, J. C. (2015). «Loess and soils in the eastern Ebro basin». *Quaternary International*, núm. 376, p. 114-133.



- BOIXADERA, J.; RIERA, S.; VILA, S.; ESTEBAN, I.; ALBERT, R. M.; LLOP, J. M.; POCH, R. M. (2016). «Buried A horizons in old bench terraces in Les Garrigues (Catalonia)». *Catena*, vol. 137, p. 635-650.
- CARRILLO, G.; LLOP, J. M.; HERRERO, C.; SIÓ, J.; BOIXADERA, J. (1998). *Mapa de sòls detallat (1/25.000) del Garrigues sud: Bovera - La Granadella*. Lleida: Generalitat de Catalunya. Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca. 174 p.
- COSTANTINI, E. A. (2018). «Paleosols and pedostratigraphy». *Applied Soil Ecology*, vol. 123, p. 597-600.
- DENEVAN, W. M. (1966). *The aboriginal cultural geography of the Llanos de Mojós of Bolivia*. Berkeley: University of California Press. (Ibero-Americana; 48)
- FAO = FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (1976). *A framework for land evaluation*. Roma: FAO. (Soils Bulletin; 32)
- (2015). *Funcions del sòl* [en línia]. <[https://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/GSP/WSD\\_2020/catalan/NRL\\_Your\\_silent\\_ally\\_Catalan.pdf](https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/GSP/WSD_2020/catalan/NRL_Your_silent_ally_Catalan.pdf)>.
- FAO-ISRIC-IUSS = FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION; INTERNATIONAL SOIL AND INFORMATION CENTRE; INTERNACIONAL UNION OF SOIL SCIENCES (1998). *World reference base for soil resources*. Roma: FAO. (World Soil Resources Reports; 84)
- FEDOROFF, N.; COURTY, M. A.; GUO, Z. (2018). «Palaeosols and relict soils: A conceptual approach». A: STOOPS, G.; MARCELINO, V.; MEES, F. *Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths*. 2a ed. Amsterdam: Elsevier, p. 821-862.
- FLORENSKI, P. V. (2020). *Cartas de la prisión y de los campos*. 2a ed. Pamplona: EUNSA. (Astrolabio Filosofía)
- HARTEMINK, A. E. (2016). «The definition of soil since the early 1800s». *Advances in Agronomy*, vol. 137, p. 73-126.
- HERRERO, C.; BOIXADERA, J.; DANÉS, R.; VILLAR, J. M. (1993). *Mapa de sòls de Catalunya. 1:25.000: Bellví*. Barcelona: Generalitat de Catalunya. Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca. Direcció General de Producció i Indústries Agroalimentàries. Departament de Política Territorial i Obres Públiques: Institut Cartogràfic de Catalunya.
- IGC-DAAM-ICC = INSTITUT GEOLÒGIC DE CATALUNYA; DEPARTAMENT D'AGRICULTURA, RAMADERIA, PESCA, ALIMENTACIÓ I MEDI NATURAL; INSTITUT CARTOGRÀFIC DE CATALUNYA (2011). *Mapa geològic de Catalunya: Geotrell IV. Mapa de sòls: les Borges Blanques: 389-1-2 (65-30): 1:25 000*. Barcelona: IGC: DAAM: ICC.
- JUNYENT, E.; LÓPEZ, J. B.; MOYA, A.; TARTERA, E. (2009). «L'accés fortificat i les portes en el sistema defensiu de la fortalesa dels Vilars (Arbeca, les Garrigues)». *Revista d'Arqueologia de Ponent*, núm. 19, p. 307-334.
- JUNYENT, E.; POCH, R. M.; BALASCH, J. C. (2012). «Water and defense system in Els Vilars fortress (Arbeca, Catalonia, Spain): A multiproxy approach». *Cypsela*, núm. 19, p. 49-70.
- LEHMANN, J.; SOLOMON, D.; KINYANGI, J.; DATHE, L.; WIRICK, S.; JACOBSEN, C. (2008). «Spatial complexity of soil organic matter forms at nanometre scales». *Nature Geoscience*, vol. 1, p. 238-242.
- MARTÍN, F.; SERRA, R. (1991). *Les construccions de pedra seca a la comarca de les Garrigues*. Lleida: Pagès.
- MERINO, E.; BANERJEE, A. (2008). «Terra rossa genesis, implications for karst, and eolian dust: A geodynamic thread». *The Journal of Geology*, vol. 116, p. 62-75.

- MONGER, H. C.; RACHAL, D. M. (2013). «Soil and landscape memory of climate change: How sensitive, how connected». A: DRIESE, S. G.; NORDT, L. C.; MCCARTHY, P. J. (ed.). *New frontiers in paleopedology and terrestrial paleoclimatology: Paleosols and soil surface analog systems*. Tulsa, Oklahoma: SEPM Society for Sedimentary Geology, p. 63-70.
- MONGER, C.; SALA, O.; DUNIWAY, M.; GOLDFUS, H.; MEIR, I.; POCH, R. M.; THROOP, H. L.; VIVONI, E. R. (2015). «Legacy effects in linked ecological-soil-geomorphic systems of drylands». *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 13, núm. 1, p. 13-19.
- PEREIRA, P.; BOGUNOVIC, I.; MUÑOZ-ROJAS, M.; BREVIK, E. C. (2018). «Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management». *Current Opinion in Environmental Science & Health*, vol. 5, p. 7-13.
- PLATA, J. M.; RODRÍGUEZ, R.; PREUSSER, F.; BOIXADERA, J.; BALASCH, J. C.; ANTÚNEZ, M.; POCH, R. M. (2021). «Red soils in loess deposits of the Western Ebro Valley». *Catena*, vol. 204, art. 105430.
- POCH, R. M. (2021). «Com es perceben els sòls: una anàlisi per millorar-ne la consciència social». A: VERICAT, D.; MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J. A.; POCH, R. M.; VIDALHUGUET, C.; QUEROL, C. (ed.). *Medi ambient i ciències del sòl: Miscel·lània homenatge a Jaume Porta*. Lleida: Diputació de Lleida. Institut d'Estudis Ilerdencs: Universitat de Lleida. Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl, p. 94-106.
- POCH, R. M.; BALASCH, J. C. (2003). *Reconstrucció paleoambiental de l'assentament iber dels Vilars (Arbeca, les Garrigues): hidrografia, hidrogeologia i edafologia*. Lleida: Universitat de Lleida. Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl. [Informe inèdit]
- POCH, R. M.; BALASCH, J. C.; ANTÚNEZ, M.; VADELL, J.; FORSS, A.; BOIXADERA, J. (2019). «A distinct pedogenetic path under a Mediterranean climate. The case of soils on Areny sandstone formation (Trempe basin, NE Iberian Peninsula)». A: DEÁK, J.; AMPE, C.; MIKKELSEN, J. H. (ed.). *Soils as records of the past and present: From soil surveys to archaeological sites: Research strategies for interpreting soil characteristics: Proc. Geoarchaeological Meeting Brugge, 6-7 Nov 2019*. Bruges: Raakvlak, p. 279-295.
- POCH, R. M.; JUNYENT, E.; BALASCH, J. C. (2014). «Funcionament del pou cisterna de la fortalesa ibera dels Vilars (les Garrigues): evidències de mesures en camp de conductivitat elèctrica de l'aigua en períodes de reg del canal d'Urgell». *Quaderns Agraris*, núm. 36, p. 51-64.
- POCH, R. M.; SIMÓ, I.; BOIXADERA, J. (2013). «Benchmark soils on alluvial, fluvial and fluvio-glacial formations of the upper-Segre valley». *Spanish Journal of Soil Science*, vol. 3, núm. 2, p. 78-94.
- POCH, R. M.; STOOPS, G. (2022). «Soil micromorphology». A: *Encyclopedia of soils in the environment*. 2a ed. Amsterdam: Elsevier. [En premsa]
- PORTA, J. (2014). *Diccionari multilingüe de la ciència del sòl* [en línia]. Barcelona: Institut d'Estudis Catalans: Sociedad Española de la Ciencia del Suelo. <<https://cit.iec.cat/DMCSC/default.asp?opcio=0>> [Consulta: juliol 2021].
- PORTA, J.; HERRERO, J. (1983). «Els sòls». A: PORTA, J.; JULIÀ, R. (ed.). *Els sòls de Catalunya: Àrea meridional de Lleida*. Barcelona: Generalitat de Catalunya. Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca, p. 69-307.



- REGSA-INARSA (1997). *Estudi detallat de sòls (1:25.000) de la zona a transformar en regadiu dominada pel canal Segarra-Garrigues (Lleida)*. Lleida. 4 v. [Directors de l'estudi: J. Boixadera i J. A. Rosell] [Informe inèdit]
- REIFENBERG, A. (1927). «Über die Rolle der Kieselsäure als Schutzkolloid bei der Entstehung mediterraner Roterden». *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde*, vol. 10, núm. 3, p. 159-186.
- SAUER, D.; POCH, R. M.; STAHR, K. (2016). «Editorial: Soils in space and time». *Catena*, vol. 137, p. 581-582.
- SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R. M. (1989). «Iron oxides». A: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (ed.). *Minerals in soil environments*. Vol. 1. 2a ed. Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America, p. 379-438.
- TARGULIAN, V. O.; GORYACHKIN, S. V. (2004). «Soil memory: Types of record, carriers, hierarchy and diversity». *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 21, núm. 1, p. 1-8.
- VEPRASKAS, M. J.; LINDBO, D. L.; STOLT, M. H. (2018). «Redoximorphic features». A: STOOPS, G.; MARCELINO, V.; MEES, F. (ed.). *Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths*. Amsterdam: Elsevier, p. 425-445.
- VOLTAS VELASCO, J.; FERRIO DÍAZ, J. P.; ALONSO, N.; ÁRAUS ORTEGA, J. L. (2008). «Stable carbon isotopes in archaeobotanical remains and palaeoclimate». *Contributions to Science*, vol. 4, núm. 1, p. 21-31.
- WEI, X.; JI, H.; LI, D.; ZHANG, F.; WANG, S. (2013). «Material source analysis and element geochemical research about two types of representative bauxite deposits and terra rossa in western Guangxi, southern China». *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 133, p. 68-87.
- YAALON, D. H. (1971). «Soil forming processes in time and space». A: *Paleopedology: Origin, nature, and dating of paleosols*. Jerusalem: International Society of Soil Science: Israel University Press, p. 29-39.
- (1983). «Climate, time, and soil development». A: WILDING, L. P.; SMECK, N. E.; HALL, G. F. (ed.). *Pedogenesis and soil taxonomy: I. Concepts and interactions*. Amsterdam: Elsevier, p. 233-251. (Developments in Soil Science; 11, part A).
- (1997). «Soils in the Mediterranean region: What makes them different?». *Catena*, vol. 28, núm. 3-4, p. 157-169.
- (2011). «Comments on soil memory and paleo-environmental reconstruction of soil evolution». *Eurasian Soil Science*, vol. 44, núm. 4, p. 462-463.
- ZIELHOFER, C.; RECIO ESPEJO, J. M.; NÚÑEZ GRANADOS, M. À.; FAUST, D. (2009). «Durations of soil formation and soil development indices in a Holocene Mediterranean floodplain». *Quaternary International*, vol. 209, núm. 1-2, p. 44-65.



