



Els Pirineus són un excel·lent laboratori natural per a estudiar els processos orogènics que han determinat la formació de les serralades. En un transversal a través del massís del Pedraforca i de la serra del Cadí es poden observar, en una reduïda extensió, les principals unitats tectòniques (mantells de corriment) que constitueixen el vessant sud dels Pirineus

ICC

Josep Anton Muñoz de la Fuente
Professor titular de geodinàmica

Pere Santanach i Prat
Catedràtic de geodinàmica

Universitat de Barcelona
Departament de Geologia Dinàmica,
Geofísica i Paleontologia

Els Pirineus

Una serralada de col·lisió continental

Introducció

Les concepcions sobre l'estructura i evolució dels Pirineus han anat variant amb l'evolució de les idees generals sobre la gènesi de les serralades (teories orogèniques) i amb la progressiva adquisició de noves dades mitjançant l'observació. Els Pirineus il·lustren bé els ràpids canvis que, en aquest camp, s'han produït en els darrers anys. A més, en el cas dels Pirineus s'ha posat de manifest amb especial claredat l'actuació d'alguns dels processos geodinàmics que intervenen en l'edificació dels orògens de col·lisió continental i en el seu posterior desmantellament. Alguns d'aquests processos, com per exemple la subducció d'escorça continental, són avui

força controvertits entre els investigadors de les ciències de la Terra, i la seva comprensió significarà, sens dubte, un pas endavant en el coneixement dels orògens.

En aquest article es presenten els principals trets de la concepció actual de l'estructura i l'evolució dels Pirineus, destacant-ne aquells aspectes més discutits i rellevants per tal d'acostar el lector no especialista no només a la geologia dels Pirineus, sinó també als orògens de col·lisió en general. Aquests últims anys, gràcies a la ràpida evolució dels coneixements de la geologia de Catalunya, i dels Pirineus en particular, s'ha produït un desfasament entre els coneixements del reduït grup d'especialistes que hi treballa i els conei-

xements àmpliament divulgats. Per sort, hi ha hagut recents iniciatives¹ que han començat a omplir aquest buit. El present article pretén ser, també, una aportació en aquest sentit. Prèviament, però, per a mostrar els canvis radicals que s'han produït durant el últims trenta anys, s'esbossaran, sense pretendre escriure'n la història², alguns dels trets principals dels models que han precedit l'actual.

Es consideraran només els principals models sobre els Pirineus postulats a partir del canvi de segle que, des del punt de vista de les idees generals, és quan es publica la monumental síntesi *Das Anlitz der Erde* d'Eduard Suess (entre 1883 i 1904), autèntica tectònica global que integra les dades estratigràfiques i paleontològiques conegudes en aquella època en una història dinàmica de la Terra³. Constitueix la culminació de la geologia clàssica, abans de l'aparició en escena de la geofísica. En aquella època es va establir un consens internacional entorn de les idees de Suess que els historiadors de la geologia donen per acabat amb la publicació el 1912 de *Die Entstehung der Kontinente* d'Alfred Wegener. A partir d'aleshores, des del punt de vista teòric, la geologia es presenta ben fragmentada. Mentre Wegener desenvolupava la seva hipòtesi de la deriva continental, d'altres investigadors formulaven diverses hipòtesis tectòniques globals de similar capacitat explicativa. La competència entre aquestes hipòtesis durant cinquanta anys (1920-1970) només s'ha acabat amb l'acceptació general de la teoria de la tectònica de plaques. I actualment la teoria geològica té un grau d'unificació com no havia tingut des de les acaballes del segle XIX. És en aquest marc que cal situar l'evolució del coneixement dels Pirineus⁴.

De l'al·loctonia a l'autoctonia

Des de les acaballes del segle XVIII i durant pràcticament tot el segle passat es van anar acumulant dades, principalment estratigràfiques i petrolològiques, dels Pirineus, que s'interpretaren successivament d'acord amb les hipòtesis neptunistes (RAMOND, 1801, PALASSOU, 1815, per exemple⁵) i dels aixecaments d'Élie de Beaumont (BEAUMONT, DE I DUFRENOY, 1830-36⁶). No és, però, fins al començament del segle XX que, gràcies a les aportacions dels estudiosos del segle passat, es disposa de suficients dades per a elaborar autèntiques interpretacions de conjunt dels Pirineus.

Les primeres es van donar a conèixer al començament del segle actual. Léon Carez, entre el 1903 i el 1909, publicà la seva geologia dels Pirineus francesos en sis volums⁷, en la que sosté que els plecs són

els elements fonamentals de l'estructura pirinenca, i el 1912 va presentar un esquema estructural de la serralada i una sèrie de mapes paleogeogràfics dels diferents terrenys mesozoics i terciaris, com també una zonació geològica de la serralada⁸: de fet, l'esbós d'una interpretació autoctonista dels Pirineus. A aquesta interpretació s'oposà la presentada per Léon Bertrand el 1907⁹, que proposa un model al·loctonista per als Pirineus centrals i orientals amb grans mantells de corriment traslladats cap al nord, interpretació que fou estesa als Pirineus occidentals per Pierre Viennot¹⁰, i fins i tot al vessant meridional, en un treball de Charles Jacob i altres¹¹ presentat al Congrés Geològic Internacional, celebrat a Madrid el 1926.

Així doncs, pràcticament de manera simultània, quedaren plantejades dues interpretacions de conjunt, una d'autoctonista i una altra d'al·loctonista. Això és, una interpretació que suposa que, tot i deformats, els terrenys secundaris i terciaris es troben aproximadament on es van dipositar (autoctonia), i una altra que postula que aquests terrenys han sofert grans translacions durant l'orogènia i, per tant, no es troben allà on es van dipositar (al·loctonia).

Va prevaler la concepció al·loctonista de Bertrand que, com ell mateix escriu a la introducció del seu treball, *est d'accord avec les connaissances orogéniques résultant de l'étude si féconde de la chaîne alpine, faite en ces dernières années*¹². Cal recordar aquí que el 1903 Maurice Lugeon i Pierre Termier¹³ havien publicat les seves síntesis, respectivament sobre els Alps suïssos i orientals, síntesis que presenten l'estructura dels Alps formada per grans mantells de corriment traslladats cap al nord. Així doncs, s'imposà la concepció que millor encaixava amb la síntesi suessiana: Suess pensava que no només els Alps en sentit estricte s'havien desplaçat cap al nord, sinó que també ho havien fet totes les grans serralades europees¹⁴. I s'imposà l'ortodòxia tot i que la interpretació de Bertrand estava basada en dades d'observació insuficients i, en diversos casos, mal interpretades.

A partir de 1930, en el marc de la competència establerta entre les idees mobilistes (possibilitat de translacions importants de masses de l'escorça com la deriva continental a escala global o mantells de corriment a l'escala de la serralada) i fixistes (impossibilitat d'aquest tipus de translacions), la hipòtesi al·loctonista (mobilista) de Bertrand entrà en crisi i s'imposà una concepció autoctonista (fixista) dels Pirineus. Enfront de la pobra argumentació de Bertrand, en aquest canvi de concepció hi col·laboraren decisivament l'aparició d'un seguit de treballs d'investigadors de les escoles de Jacob (de la

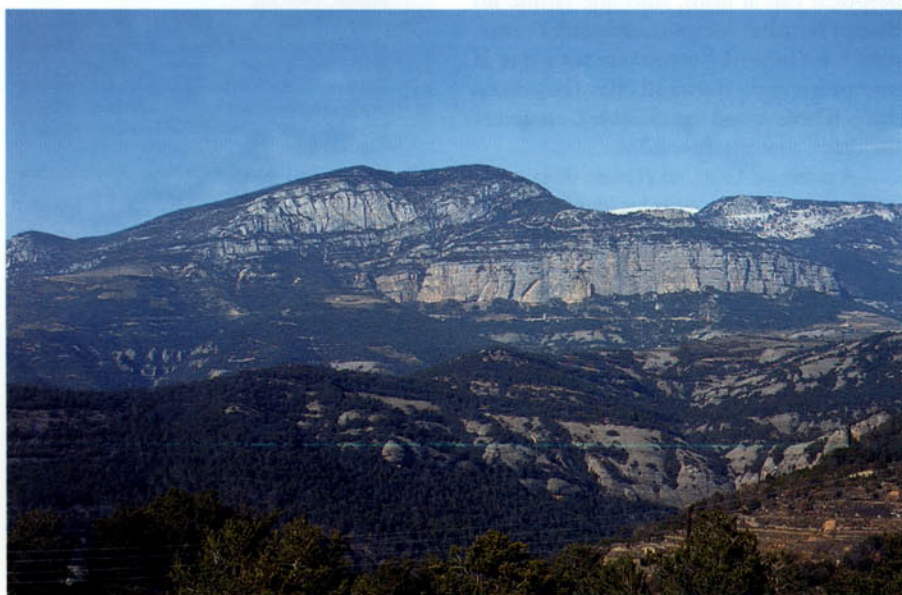
Notes:

1. Cal destacar els dos primers volums de la *Història Natural dels Països Catalans*, d'Enciclopèdia Catalana SA; la col·lecció de diapositives didàctiques editades pel Servei Geològic de Catalunya: MARTÍNEZ, A., MUÑOZ, J.A., BUSQUETS, P. I VILAPLANA, M. (1993): *Col·lecció didàctica de diapositives. La formació dels Pirineus. Interpretació a partir d'un tall geològic als Pirineus centrals*, 58 diapositives i memòria explicativa, 37 pàg., i l'estand sobre la geologia dels Pirineus del Museu de la Ciència de Barcelona.
2. Una història del desenvolupament del coneixement de l'estructura dels Pirineus es troba a FONTBOTÉ, J.M. (1991): "Reflexions sobre la tectònica dels Pirineus", a *Memòria de la Reial Acadèmia de Ciències i Arts de Barcelona*, núm. 889, volum L, núm. 7, pàg. 303-352.
3. Les idees essencials del pensament de Suess es troben ja a *Die Entstehung der Alpen*, publicat el 1875, on fa una sinopsi i crítica de les teories que hi havia sobre la formació dels Alps. *Die Entstehung der Alpen* constitueix la base teòrica de la major part del treball desenvolupat per Suess posteriorment.
4. Per a l'evolució de les idees sobre les teories orogèniques durant el segle XIX, vegeu GREEN, M.T. (1982): *Geology in the Nineteenth Century. Changing Views of a Changing World*, 324 pàg. Cornell University Press.
5. RAMOND (1801): *Voyage au Mont Perdu et dans la partie adjacente des Hautes-Pyrénées*, 352 pàg.; PALASSOU, M. (1815): *Mémoire pour servir à l'histoire naturelle des Pyrénées et des Pays adjacents*, XVI + 485 pàg. Imp. Vignancourt, Pau.
6. BEAUMONT, É. DE I DUFRENOY, A. (1830-1836): *Mémoires pour servir à une description géologique de la France redigés par ordre de Becey*, 3 volums, 469, 474 i 359 pàg. F.G. Leurault, Paris.
7. CAREZ, L. (1903-1909): "La géologie des Pyrénées françaises", a *Mémoire Carte Géologique de France*, 6 volums, 3 900 pàg.
8. CAREZ, L. (1912): "Résumé de la Géologie des Pyrénées françaises", a *Mémoire Société Géologique de France*, sèrie 4, volum II, núm. 7, 129 pàg.
9. BERTRAND, L. (1907): "Contribution à l'histoire stratigraphique et tectonique des Pyrénées orientales et centrales", a *Bulletin Service Carte Géologique de France*, núm. 118, volum XVII, 183 pàg.
10. VIENNOT, P. (1927): "Recherches structurales dans les Pyrénées occidentales françaises", a *Bulletin Service Carte Géologique de France*, núm. 30 (163), 268 pàg.
11. JACOB, CH., FALLOT, P., ASTRE, G. I CIRY, R. (1927): *Observations tectoniques sur le versant méridional des Pyrénées Centrales et Orientales*, núm. 2, pàg. 335-411. Congrés Geològic Internacional de Madrid, 1926.
12. BERTRAND, L. (1907): *Op. cit.*, pàg. 1.
13. LUGÉON, M. (1903): *Les grandes nappes de recouvrement des Alpes suisses*, pàg. 477-506. C.R. IX Congrés Geològic Internacional; TERMIER, P. (1903): "Les nappes des Alpes orientales et la synthèse des Alpes", a *Bulletin de la Société Géologique de France*, sèrie 4, núm. 3, pàg. 711-766.
14. Idea ja expressada a *Die Entstehung der Alpen* (1875), tot i que en aquesta obra no es refereix explícitament als Pirineus; si que ho fa a *Das Anlitz der Erde*, on accepta bàsicament les idees de Bertrand (ed. francesa, volum III, pàg. 923-926, 1911).

Notes:

- Entre els membres de l'escola de Stille destaca el treball de P. Misch al vessant meridional dels Pirineus centrals.
- JACOB, CH. (1930): *Zone axiale, versant sud et versant nord des Pyrénées. Livre Jubilaire 1830-1930*, pàg. 389-410. Centenari de la Société Géologique de France.
- ARGAND, É. (1922): *La Tectonique de l'Asie*, fascicle 1, pàg. 171-327. C.R. XIII Congrès Géologique International.
- Vegeu SOLÉ SABARIS, L. (dir.) (1958-1964): *Geografia de Catalunya*, volum 1, 665 pàg. Ed. Aedos.
- SEGURET, M. (1972): *Étude tectonique des nappes et des séries décollées de la partie centrale du versant sud des Pyrénées*, núm. 2, 162 pàg. (tesi doctoral, 1970). Publications USTELA, Série Géologique Structural. Montpellier.
- Fites essencials de l'establiment de la doctrina de la tectònica de plaques són LE PICHON, X. (1968): "Seafloor spreading and continental drift", a *Journal Geophysical Research*, núm. 73, pàg. 3 661-3 697; DEWEY, J.F. i BIRD, J.M. (1970): "Plate tectonics and geosynclines", a *Tectonophysics*, núm. 10, pàg. 625-638; DEWEY, J.F. i BIRD, J.M. (1970): "Mountain belts and the new global tectonics", a *Journal Geophysical Research*, núm. 75, pàg. 2 615-2 647.

Foto 2: Encavalcament frontal sud-pirinenc a la serra del Port del Comte. En el bloc superior de l'encavalcament els materials són calcàries de l'Eocè inferior, que se superposen damunt de capes subhorizontals de conglomerats de l'Oligocè inferior



J. A. MUÑOZ

Sorbona) i de Stille (de Göttingen)¹⁵ que defensaven hipòtesis autoctonistes fonamentades en recerques minucioses basades en cartografies geològiques acurades.

Charles Jacob¹⁶, en un article publicat al llibre commemoratiu del centenari de la Societat Geològica de França (1930), va exposar els grans trets del model autoctonista. Els Pirineus serien una serralada de fons (radicalment diferent de la dels Alps i que en cap cas no comportaria l'existència de mantells de corriments), tal com havia suggerit el prestigiós tectònic suís Émile Argand en la seva *Tectonique de l'Asie* (1922)¹⁷. Així doncs, en els Pirineus, sobre un sòcol rígid i fràgil constituït per materials paleozoics deformats durant l'orogènesi hercíniana, es dipositaren discordantment els terrenys secundaris i terciaris. En àmplies àrees de la serralada, el comportament d'aquests darrers terrenys durant l'orogènesi pirinenca hauria estat condicionat pel desenvolupament, en el sòcol, d'una estructura de blocs limitats per falles fortament inclinades. Els terrenys secundaris i terciaris formarien plects tot adaptant-se a aquestes estructures del sòcol. Només localment la cobertura mesocenozoica s'hauria desenganxat del sòcol. En aquest marc, la zona axial de la serralada correspondria a una àrea que ja durant el Mesozoic representava un relleu, embrió dels Pirineus, emergida o recoberta per una capa prima d'aigua, i que constituïa un llindar que separava dues conques mesozoiques, la nord-pirinenca i la sud-pirinenca. En elles s'haurien dipositat els materials que avui es troben respectivament al nord i al sud de la zona axial. Durant el Terciari, els terrenys mesozoics s'haurien plegat i fallat, mentre que amb prou feines ho haurien fet els més antics de la zona axial. Com a resultat d'aquests processos de deformació s'hauria aixecat la

serralada, el desmantellament de la qual, simultani a la seva formació, hauria conduït al reblliment de les conques d'Aquitània, al nord, i de l'Ebre, al sud. En resum, un model autoctonista, simètric, amb una clara diferenciació, tant paleogeogràfica com estructural, de la zona axial i els terrenys de la cobertura que la voregen.

La concepció autoctonista esbossada va orientar els treballs dels estudiosos de la geologia dels Pirineus fins al començament dels anys setanta. L'última gran escola que defensà una concepció radicalment autoctonista dels materials del sòcol que aflora a l'eix de la serralada, la zona axial, fou l'escola holandesa: la zona axial s'hauria comportat com un bloc rígid sense participar en la tectònica de plegament de la cobertura. Avui, aquesta concepció autoctonista és encara la més divulgada. I és sota aquesta òptica, amb totes les implicacions paleogeogràfiques que comporta, que cal entendre la clàssica divisió dels Pirineus, i de Catalunya, en unitats geològiques, que considera el Pirineu axial, els Pre-Pirineus, la Depressió Central i els Catalànides¹⁸.

Cap a una nova concepció dels Pirineus

A partir del començament dels anys setanta fins a l'actualitat s'ha anat gestant un nou model de l'estructura dels Pirineus, acceptat en les seves línies generals per la comunitat científica a partir de finals dels anys vuitanta. L'inici de la ruptura amb la concepció autoctonista pot situar-se el 1970 amb la tesi de Michel Seguret¹⁹ sobre l'estructura del vessant sud dels Pirineus. L'anàlisi de les relacions entre estructures de diferents dimensions el portà a una interpretació al·loctonista per a la cobertura del vessant sud dels Pirineus, amb importants translacions, cap al sud, però. Només localment acceptà Seguret la participació del sòcol hercinià en la tectònica de corriments. A partir d'aquest moment, el progrés del coneixement dels Pirineus entrà en una etapa extraordinàriament dinàmica impulsada, d'una banda, per les dades aconseguïdes amb els estudis per a la prospecció d'hidrocarburs i, d'altra banda, per la formulació de la teoria de la tectònica de plaques o tectònica global.

Els principis fonamentals de la tectònica de plaques—l'expansió dels fons oceànics, la divisió de la litosfera en un cert nombre de plaques rígides, els moviments relatius d'aquestes damunt de l'astenosfera, el comportament diferenciat de les zones marginals de les plaques amb la localització en aquest espai de l'activitat sísmica, volcànica, deformacions tectòniques, etc.—varen ésser integrats per primera vegada en un cos doctrinal coherent poc abans de 1970²⁰. La tectònica de plaques és una teoria que expli-



J. A. MUÑOZ

ca la dinàmica actual de les capes externes de la Terra i que integra la dinàmica tant de les masses continentals com dels fons oceànics. L'aplicació d'aquesta teoria a la comprensió de la formació de serralades antigues no és més que la seva extrapolació en el passat, l'aplicació del principi de l'actualisme a la tectònica a l'escala global. Per a fer-ho cal la integració de treballs geològics i geofísics, pràctica que s'ha mostrat extraordinàriament fecunda.

Aquest marc teòric, d'una banda, ha impulsat la reinterpretació de les dades geològiques que havien estat recollides fins aleshores i, d'altra banda, ha integrat les dades aconseguïdes gràcies a la prospecció d'hidrocarburs, en molts casos mitjançant tècniques geofísiques. L'estudi de la cobertura sedimentària, fins a uns 5 km de profunditat, ha fet grans avenços amb la integració de la geologia de superfície amb les dades provinents dels sondatges petrolers i de la prospecció sísmica, tècnica aquesta que permet de detectar i situar superfícies estructurals (falles, superfícies d'encavalcament i corriments), grans canvis litològics (capes de sal) i discontinuïtats estratigràfiques (sostre del sòcol). N'ha resultat un coneixement precís de la successió d'esdeveniments de la història geològica i, molt important, ha fet possible la correlació dels terrenys sedimentaris no plegats de les conques sud i nord-pirinèniques (conques d'avantpaís de l'Ebre i d'Aquitània) amb la seva continuació a les

zones plegades. Tot plegat ha conduït a l'obtenció d'una visió tridimensional de les conques d'avantpaís associades a la formació dels Pirineus. L'estudi de l'escorça i el mantell superior s'ha realitzat mitjançant sísmica profunda (refracció i reflexió) i estudis gravimètrics. Molt recentment s'ha utilitzat la prospecció magnetotellúrica, que permet de determinar la distribució de les conductivitats en fondària i lateralment. Amb aquestes tècniques s'ha obtingut una imatge, fins ara desconeguda, de les escorces superior i inferior i de la part superior del mantell litosfèric, que ha permès d'elaborar una nova visió de l'estructura de la serralada i, per tant, de la seva història geològica.

L'orogen pirinenc en el marc de la tectònica de plaques

Els orògens –i, per tant, les serralades– es desenvolupen a les vores de les plaques com a resultat dels successius moviments relatius de les plaques adjacents²¹. Els Pirineus són un orogen del cicle alpí que s'ha desenvolupat en el contacte entre les plaques ibèrica i eurasiàtica. Entès així, l'orogen pirinenc és molt més extens que la serralada dels Pirineus en sentit orogràfic. D'est a oest s'estén des de la Provença, on queda obliterat per les estructures dels Alps, formats amb posterioritat als Pirineus, fins més enllà de Galícia, al mig de l'oceà Atlàntic, on limita amb escorça oceànica formada a la dorsal atlàntica posteriorment

Foto 3: Encavalcaments del Cotiella que sobreposen les unitats superiors damunt de les inferiors. Els cingles de Peña Solana (esquerra) i Peña Montañesa (dreta) afaïçonats sobre mantells superiors, mentre que a les parts baixes dels relleus afloren les margues i gresos d'origen turbidític de l'Eocè inferior que pertanyen als mantells inferiors. El límit entre ambdues unitats, ben horitzontal, és un encavalcament que comporta un desplaçament d'uns 20 km cap al sud dels materials més antics dels mantells superiors sobre els més moderns dels inferiors

Notes:

21. Vegeu treballs de J.F. Dewey i J.M. Bird, nota 20.



Figura 1: L'orogen pirinenc entre les plaques eurasiàtica i ibèrica. Les estructures pirinenques s'estenen des de la Provença, on queden tallades per les més joves dels Alps, fins al mig de l'oceà Atlàntic, on queden interrompudes per l'escorça oceànica de formació posterior a la serralada

al desenvolupament dels Pirineus. S'hi poden distingir quatre sectors:

- 1) Entre els Alps i el cap de Creus, on gran part de la serralada pirinenca es troba sota les aigües del golf de Lleó, la formació del qual tingué lloc durant el Neogen –Terciari superior–, en una etapa extensiva posterior. D'aquest sector de l'orogen pirinenc, només n'afloren les parts més septentrionals al llarg de la costa de la Provença i el Llenguadoc.
- 2) Els Pirineus pròpiament dits o Pirineus ístmics, entre el cap de Creus i el golf de Biscaia.
- 3) El sector que va des del golf de Biscaia fins a Galícia i que comprèn tant les muntanyes del País Basc i la serralada Cantàbrica com les estructures submarines de la plataforma cantàbrica.
- 4) El sector més occidental, enllà de la costa occidental de Galícia fins a l'anomalia magnètica 13, posterior a la formació dels Pirineus, al mig de l'oceà Atlàntic.

L'objectiu d'aquest article és l'estructura i l'evolució de la serralada dels Pirineus, del sector de l'orogen situat entre el cap de Creus i el golf de Biscaia, sector que correspon als Pirineus en sentit geogràfic. Això no obstant, en aquest apartat d'enquadrament es farà referència als dos sectors centrals de la serralada, i l'atenció es centrarà, finalment, en l'estructura i evolució dels Pirineus ístmics.

Les característiques dels diferents sectors de l'orogen pirinenc són el resultat del moviment relatiu entre les plaques eurasiàtica, ibèrica i africana i de l'evolució dels seus límits durant els temps secundaris i terciaris. Durant el Secundari o Mesozoic, simultàniament amb l'obertura de l'Atlàntic, la placa ibèrica tendí a separar-se de l'eurasiàtica. Com a conseqüència, durant el Cretaci inferior, a la zona de contacte entre ambdues plaques tingué lloc un procés de *rifting* –estirament i aprimament de la litosfera–, de diferent intensitat segons els sectors. Així, al golf de Biscaia l'escorça continental es trencà i hi tingué lloc la for-

mació progressiva d'escorça oceànica. Cap a l'est (Pirineus ístmics) l'estirament minvà progressivament, de manera que no es va arribar a l'oceanització. Es desenvoluparen fosses tectòniques, que van actuar com a solcs sedimentaris simultàniament amb l'extensió i mentre la placa ibèrica girava en sentit levogir. Durant el Cretaci superior la placa ibèrica es desplaçà lateralment, en sentit levogir, respecte de l'europea. Més tard, entre el Cretaci superior i el Miocè inferior, les plaques ibèrica i eurasiàtica convergiren. Al golf de Biscaia, al llarg de l'actual plataforma cantàbrica, la litosfera oceànica subduí –és a dir, s'enfonsà– sota la litosfera continental de la placa ibèrica. En el domini dels Pirineus ístmics, en canvi, va ser la placa ibèrica, continental, la que va subduir sota l'eurasiàtica, també continental. Resultat d'aquesta subducció continental va ser la col·lisió entre Ibèria i Euràsia i, com a conseqüència, la deformació de l'àmbit pirinenc, prèviament aprimat i fallat durant l'extensió mesozoica, donant lloc a l'aixecament dels Pirineus.

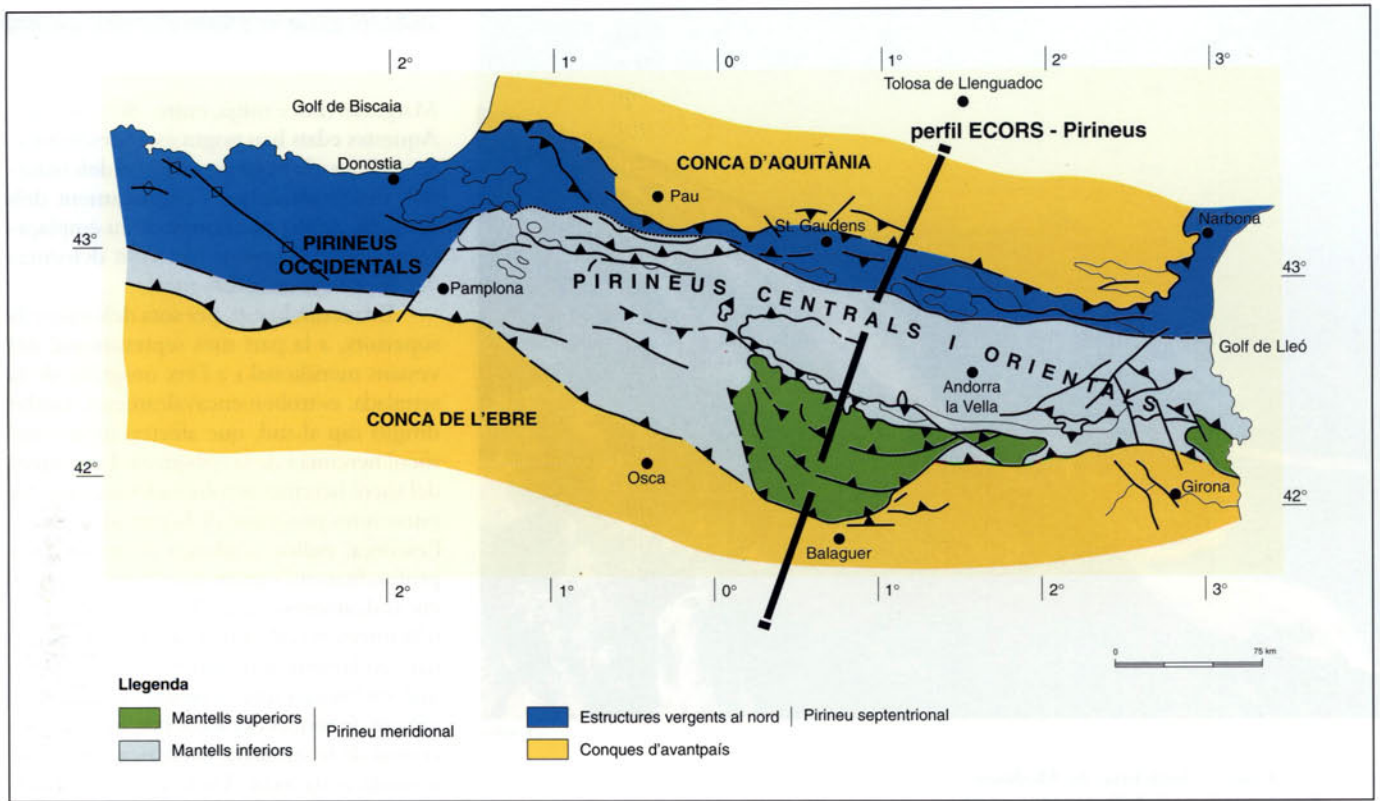
Durant la major part de la convergència (del Cretaci superior a l'Eocè superior), la placa ibèrica va romandre soldada a la placa africana, formant-ne part. Així doncs, l'orogen pirinenc és, durant aquest període, el límit entre les plaques africana i eurasiàtica, i constitueix, per tant, l'extrem occidental del sistema alpí. El final de la formació de la serralada pirinenca representa la soldadura entre la placa africano-ibèrica i l'europea. Donat que la convergència entre les plaques africana i eurasiàtica continuava i l'orogen pirinenc no podia absorbir ja els esforços, la deformació alpina es va propagar cap al sud i es generalitzà a tota la placa ibèrica, formant-se les serralades que s'alcen al seu interior, com la serralada Ibèrica i el sistema Central. Finalment, el límit entre Àfrica i Euràsia, el sistema alpí, es traslladà definitivament al domini bètic, al sud de la placa ibèrica, on es formà la serralada Bètica. Així, la placa ibèrica quedà incorporada a l'eurasiàtica²².

L'estructura dels Pirineus ístmics

L'estructura de la serralada pirinenca, tant la superficial com la cortical, és avui ben coneguda. En el coneixement de l'estructura de conjunt de la serralada han estat essencials les tècniques geofísiques, i molt particularment l'adquisició del perfil de sísmica de reflexió profunda ECORS-Pirineus, que es realitzà els anys 1985 i 1986, gràcies a la col·laboració d'institucions franceses i espanyoles²³. Aquest perfil, amb una llargada de 250 km, s'estén des de prop de Tolosa de Llenguadoc, al nord de la serralada, fins a prop de Balaguer, al sud. A més del perfil de sísmica de reflexió es realitza-

Notes:

22. D'ençà dels anys setanta s'han publicat nombroses aproximacions als moviments relatius de les plaques que ens interessien. Un de recent, on es poden trobar referències de treballs anteriors, és: SRIVASTAVA, S.P., ROEST, W.R., KOVACS, L.C., OAKLEY, G., LÉVESQUE, S., VERHOEF, J. i MACNAB, R. (1990): "Motion of Iberia since the Late Jurassic: Results from detailed aeromagnetic measurements in the Newfoundland Basin", a *Tectonophysics*, núm. 184, pàg. 229-260.
23. Vegeu ECORS PYRENEES TEAM (1988): "The ECORS deep reflection seismic survey across the Pyrenees", a *Nature*, núm. 331, pàg. 508-511. També CHOUKROUNE, P. i ECORS TEAM (1989): "The ECORS-Pyrenean deep seismic profile reflection data and the overall structure of an orogenic belt", a *Tectonics*, núm. 8, pàg. 23-39.
24. Bàsicament es resumeixen algunes de les idees de J.A. Muñoz expressades a MUÑOZ, J.A. (1992): "Evolution of a continental collision belt: ECORS-Pyrenees crustal balanced cross-section", a McCLAY, K. (ed.): *Thrust tectonics*, pàg. 235-246. Chapman & Hall. Londres. Aquest treball conté una abundant i seleccionada bibliografia. El Servei Geològic de Catalunya ha publicat un excel·lent pòster acompanyat d'una memòria explicativa sobre les dades i interpretació d'aquest perfil: BERÀSTEGUI, X., LOSANTOS, M., MUÑOZ, J.A. i PUIGDEFABREGAS, C. (1993): *Tall geològic del Pirineu central 1:200 000*. Servei Geològic de Catalunya i Institut Cartogràfic de Catalunya, Departament de Política Territorial i Obres Públiques, Generalitat de Catalunya.



ren estudis complementaris al llarg del perfil (gravimetria, sísmica de refracció, anomalies magnètiques) que juntament amb les dades de geologia de superfície van ser de gran utilitat per a la interpretació de les dades de la sísmica de reflexió. Recentment, les dades adquirides mitjançant la prospecció magnetotel·lúrica al llarg del perfil han aportat informació de gran interès per a la interpretació de les parts més profundes de la serralada. La localització del perfil ECORS-Pirineus va ser escollida tenint en compte que al llarg d'aquesta transversal de la serralada es travessen totes les unitats geològiques que la constitueixen i que, per tant,

podria oferir, a grans trets, una imatge representativa de l'estructura general dels Pirineus ístmics a l'est de la transversal de Pamplona. És per això que per descriure l'estructura dels Pirineus ens centrarem principalment en aquest perfil².

El primer tret que destaca és la diferent estructura de l'escorça superior i de la inferior. Així, l'estructura de l'escorça superior està formada per un sistema d'encavalcaments que, en secció N-S, mostra una geometria característica en forma de ventall. Per sota, l'escorça inferior presenta una estructura molt senzilla: l'escorça inferior de la placa ibèrica s'enfonsa per

Figura 2: Les grans unitats estructurals dels Pirineus. La divisió en Pirineus septentrionals i meridionals es basa en la vergència nord i sud de les estructures. Així als Pirineus septentrionals els encavalcaments s'han desplaçat majoritàriament cap al nord i els plecs s'inclinen en el mateix sentit, mentre que als Pirineus meridionals ho fan cap al sud. Els Pirineus meridionals estan constituïts per un conjunt de mantells, entre els quals es poden distingir els mantells superiors, formats només per roques de cobertura, i els mantells inferiors, que inclouen roques del sòcol hercinià i de la cobertura. S'ha situat el perfil ECORS en el qual s'ha basat el tall geològic i les restitucions parcials de la figura 3

(Font: Tall geològic del Pirineu central 1:200 000. Servei Geològic de Catalunya i Institut Cartogràfic de Catalunya, Departament de Política Territorial i Obres Públiques, Generalitat de Catalunya. 1993)

J. A. MUÑOZ



Foto 4: Encavalcament del Montsec. Les calcàries mesozoïques que constitueixen els cingles de la serra del Montsec han estat desplaçades vers el sud uns 10 km i s'han superposat damunt dels materials de l'Eocè que afloren a la vall d'Àger. A la fotografia s'observa aquests materials eocens plegats en sinclinal



J. A. MUÑOZ

Foto 5: Anticlinal de Mediano.
Aquest anticlinal deforma materials mesozoics i de l'Eocè inferior. Els cingles corresponen a calcàries amb alveolines de l'Ilerdià

sota de la de l'europea, és a dir, la placa ibèrica subdueix sota la placa europea. La diferent estructura de les escorces superior i inferior implica un desenganxament de l'escorça superior de la inferior que la suporta. Es diu que l'escorça (la de la placa ibèrica, com veurem) ha sofert delaminació durant la col·lisió.

En el ventall d'encavalcaments de l'escorça superior es poden distingir tres grans unitats, que de sud a nord són: les làmines encavalcants o mantells superiors i les làmines encavalcants o mantells inferiors, que constitueixen els Pirineus meridionals i tenen vergència sud, i les unitats septentrionals de vergència nord, que constitueixen els Pirineus septentrionals²⁵.

Els mantells superiors, al vessant meridional dels Pirineus, estan definits per encavalcaments imbricats dirigits cap al sud, de manera que cada unitat encavalca sobre la que té al sud. Afecten només materials de la cobertura secundària i terciària. Aquestes làmines encavalcants o mantells de cobertura se sobreposen en la major part de la seva extensió als terrenys terciaris, continuació dels de la conca de l'Ebre, la conca d'avantpaís meridional dels Pirineus. En els Pirineus centrals s'han definit tres mantells de cobertura imbricats que, d'inferior a superior —o de sud a nord—, són el de les serres Marginals, el del Montsec i el de Bóixols. Aquests mantells segueixen als Pirineus orientals, on constitueixen els mantells del Pedraforca. L'edat de l'emplaçament dels mantells és variable. Durant el Cretaci superior (aproximadament fa uns 80 milions d'anys) s'emplaçà el més superior, el de Bóixols, i posteriorment, de manera successiva, ho feren el del Montsec (Eocè inferior, entre -55 i -50 Ma) i el de les serres

Marginals (Eocè mitjà, entre -50 i -40 Ma). Aquestes edats han pogut ésser determinades gràcies a la bona preservació dels materials dipositats durant l'emplaçament dels mantells. Amb posterioritat al seu emplaçament aquestes unitats han estat deformades (Eocè superior-Oligocè).

Estructuralment, per sota dels mantells superiors, a la part més septentrional del vessant meridional i a l'eix orogràfic de la serralada, es troben encavalcaments, també dirigits cap al sud, que afecten roques del sòcol hercinià i de la cobertura. Les roques del sòcol hercinià involucrades en aquestes estructures provenen de la part superior de l'escorça; enlloc n'afloren de formades a profunditats més grans que 15 km. Aquests encavalcaments apilen els anomenats mantells inferiors i descriuen una forma anticlinal —apilament antiforme— de dimensions quilomètriques que ocasiona l'extens aflorament de roques del sòcol hercinià a la part central de la serralada, la clàssicament anomenada zona axial. En la zona axial, dels mantells que constitueixen l'apilament antiforme n'afloren tres que, de superior a inferior, són el de les Nogueres, el de l'Orri i el de Rialp. Aquestes unitats no només s'apilaren i plegaren en forma anticlinal, sinó que a més van ser desplaçades cap al sud lliscant sobre l'escorça inferior. La incorporació successiva de mantells de corriment per sota dels emplaçats prèviament produí el seu apilament antiforme i la deformació dels mantells de sòcol i cobertura emplaçats amb anterioritat més al sud. El desplaçament cap al sud del mantell superior de sòcol hercinià va tenir lloc simultàniament i solidàriament amb el desplaçament, també cap al sud, dels mantells de Bóixols i del Montsec entre el Cretaci superior i l'Eocè mitjà, mentre que l'emplaçament de les unitats inferiors de sòcol, i per tant el desenvolupament de l'apilament antiforme, va tenir lloc a l'Eocè superior-Oligocè (entre -40 i -30 Ma).

El conjunt de mantells dirigits cap al sud, els superiors i els inferiors, constitueixen els Pirineus meridionals. És important notar que tant la cobertura mesocenozoica com el sòcol hercinià estan implicats en un únic sistema d'encavalcaments, el gran apilament de làmines encavalcants o mantells de corriment, que formen la branca meridional del ventall d'encavalcaments en què s'estructuren els Pirineus.

L'apilament antiforme de la zona axial està limitat, al nord, per la falla nord-pirinenca, una falla de primer ordre. Es tracta d'una zona de falla estreta que es caracteritza per la presència de materials del Juràssic i del Cretaci inferior afectats per una deformació i un metamorfisme de gradient tèrmic elevat ocorreguts durant el Cretaci mitjà, al voltant dels -95 Ma. En aquesta

Nota:

25. Una descripció més detallada de les estructures i història geològica dels Pirineus, amb abundants descripcions i referències locals pel que fa als Pirineus catalans, es pot consultar a *Història Natural dels Països Catalans*, volum 2 (Geologia II), pàg. 36-94.

zona, de manera molt localitzada, afloren roques granulítics provinents de l'escorça inferior i roques originàries del mantell superior, les lersolites, un tipus de peridotites que reben el nom de l'estany de Lers, on han estat definides.

Al vessant septentrional, al nord de la falla nord-pirinenca, es troben encavalcaments dirigits cap al nord, que afecten tant les roques del sòcol com de la cobertora mesocenozoica, els quals defineixen les unitats nord-pirinenques. Els materials del sòcol afloren en els anomenats massissos nord-pirinenques, com per exemple els massissos de l'Aglí, Saint Bartomieu, Ariza, etc. Les unitats nord-pirinenques se superposen, a través de l'encavalcament frontal nord-pirinenc, als terrenys terciaris de la conca d'Aquitània, la conca d'avantpaís nord-pirinenca.

La disposició, a grans trets, en ventall descrita no implica una simetria de l'orogen. L'estructura als dos vessants dels Pirineus és força diferent. Tant els encavalcaments que defineixen els mantells inferiors i que afecten el sòcol que aflora a l'eix de la serralada, com les imbricacions de les làmines superiors de cobertora del vessant meridional, estan dirigits cap al sud—vergeixen cap al sud—i totalitzen una quantitat de desplaçament molt superior a la dels encavalcaments vergents al nord dels Pirineus septentrionals. La restitució geomètrica de les unitats amuntegades a les seves posicions originals ha permès avaluar un escurçament acumulat de l'ordre del centenar de quilòmetres pel que fa als encavalcaments dels Pirineus meridionals, mentre que els dels septentrionals en totalitzen 35.

La asimetria de l'orogen queda ben manifestada en l'estructura de l'escorça inferior: l'escorça inferior i el mantell litosfèric de la placa ibèrica subdueixen sota la placa europea. La quantitat d'escorça inferior i mantell litosfèric que ha subduït, deduïda a partir del tall cortical construït amb les dades del perfil ECORS-Pirineus, és clarament inferior a la que caldria suposar tenint en compte l'escurçament avaluat per a l'escorça superior. Hi hauria una part de l'escorça inferior subduïda que no hauria quedat enregistrada en el perfil de sísmica de reflexió, però que ha pogut ésser posada de manifest per la prospecció magnetotel·lúrica²⁶. Efectivament, en la prolongació de l'escorça inferior i mantell litosfèrics subduïts ha estat detectada una forta anomalia d'alta conductivitat elèctrica que es continua fins a una profunditat d'uns 80 km. Això no només permet de detectar la part de material subduït no reflectida en la sísmica de reflexió, sinó que, a més, informa sobre el seu estat de fusió parcial, causa de l'elevada conductivitat²⁷.



J. VERGÉS

Cal destacar que amb l'estudi de la serralada pirinenca s'han aportat moltes dades que permeten deduir la subducció d'una part de l'escorça continental conjuntament amb el mantell litosfèric per sota d'una altra placa també continental. Aquest fenomen ja havia estat invocat per explicar altres serralades de col·lisió, com per exemple els Alps, però no ha estat fins ara, en els Pirineus, que s'han pogut aportar dades per argumentar sòlidament la seva existència. La subducció d'escorça continental no és acceptada per tots els investigadors, ja que transgredeix alguns dels principis bàsics de la teoria de la tectònica de plaques, que només contempla la subducció d'escorça oceànica, més densa que la continental. Malgrat tot, la idea de la subducció d'escorça continental permet d'explicar certs fenòmens geològics que ocorren als orògens de col·lisió, com per exemple l'abundància de roques granítiques, i es pot entendre si es considera la diferència de densitats entre els mantells litosfèric i astenosfèric i l'estat tèrmic de la placa que subdueix, relativament freda.

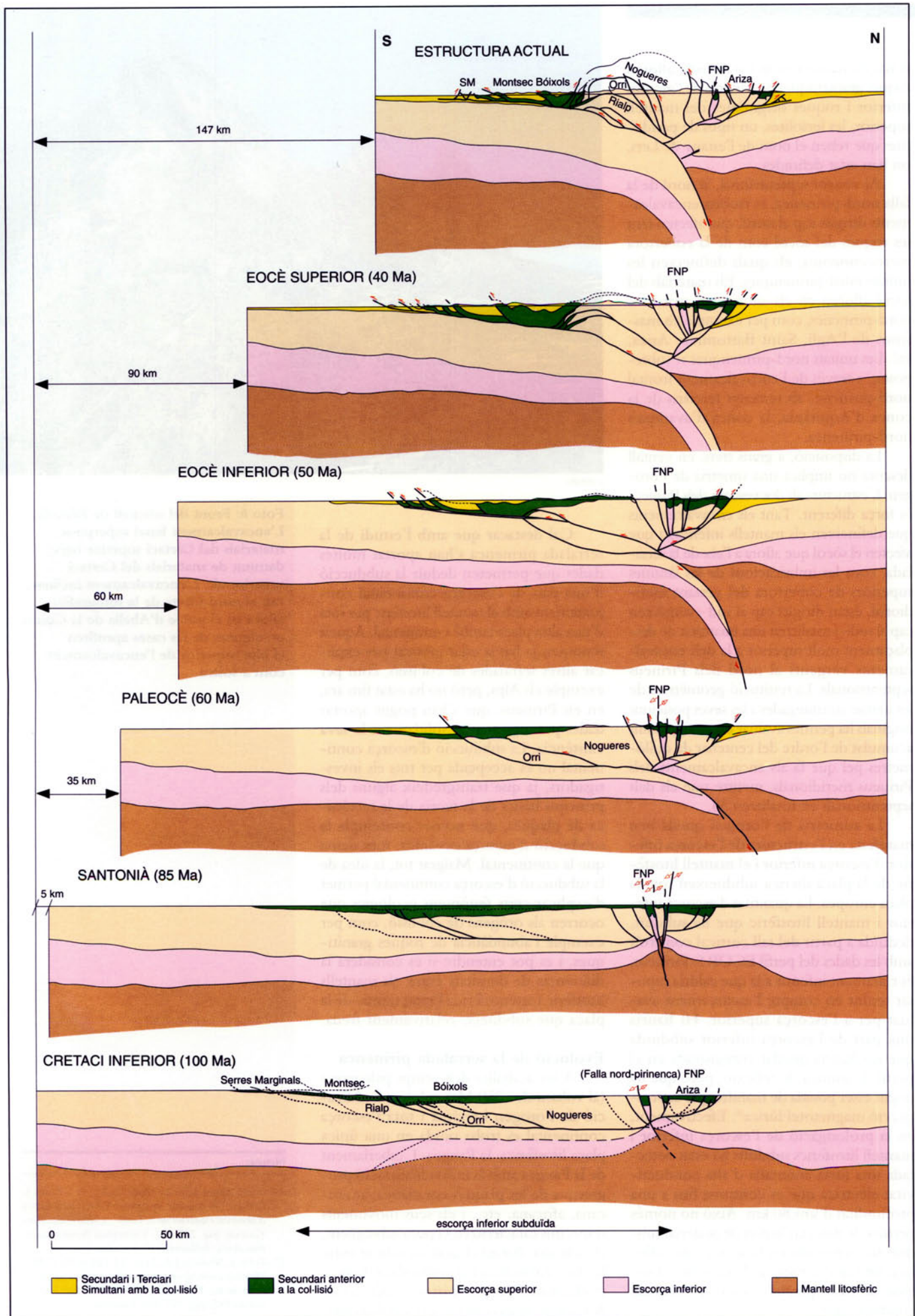
Evolució de la serralada pirinenca

A les acaballes dels temps paleozoics (al voltant de -250 Ma) culmina l'edificació de l'orogen hercinià i tota l'escorça continental es troba unida en una única placa litosfèrica, la Pangea. L'esberlament de la Pangea amb la individualització progressiva de les plaques eurasiàtica, americana, africana, etc., i els seus moviments respectius caracteritzen l'època subsegüent, el cicle alpí, durant el qual, en el límit entre la placa eurasiàtica i la petita placa ibèrica, evoluciona l'orogen pirinenc per donar lloc, en un tram concret, a la serralada piri-

Foto 6: Front del mantell de Bóixols. L'encavalcament basal superposa materials del Cretaci superior baix damunt de materials del Cretaci superior alt. L'encavalcament inclinat cap al nord (dreta de la fotografia) aflora en el poble d'Abella de la Conca on algunes de les cases aprofiten el bloc superior de l'encavalcament com a sostre

Notes:

26. Sobre aquest mètode, MARCUELLO, A. i POUS, J. (1991): "El mètode magnetotel·lúric: una forma d'observar l'interior de la Terra", a *Miscel·lània Enric Casassas*, pàg. 227-231. Universitat Autònoma de Barcelona. Bellaterra.
27. POUS, J., MUÑOZ, J.A., LEDO, J.J. i LIESA, M. (1995): "Partial melting of subducted continental lower crust in the Pyrenees", a *Journal Geologic Society*, volum 152, pàg. 217-220. Londres.



nenca. En un apartat anterior ja s'han esbossat els grans trets dels moviments relatius de les plaques que voregen els Pirineus. En aquest es repassarà com durant la història alpina s'ha anat formant l'estructura descrita en els apartats anteriors i quins grans trets paleogeogràfics ha anat presentant el domini pirinenc durant aquesta història.

Al començament del Mesozoic (voltants de -240 Ma), sobre l'extensa península desenvolupada sobre els materials deformats durant l'orogènia herciniana, en clara discordança, comença la deposició de sediments netament continentals. En una primera etapa, que s'estén fins al començament del Cretaci inferior (-140 Ma), no hi ha un domini pirinenc ben individualitzat. Aquesta àrea, sotmesa a condicions distensives més aviat suaus, a l'igual que les regions que l'envolten, es veu afectada d'una subsidència moderada i s'hi dipositen, de manera dominant, sediments detrítics continentals i roques calcàries de plataforma carbonàtica.

A partir del Cretaci inferior, com a conseqüència d'una important extensió, s'individualitza el domini pirinenc gràcies a un considerable aprimament de la litosfera mitjançant un sistema de falles normals lístriques que, condicionades per l'estructura herciniana del sòcol, s'horitzontalitzaran al límit entre les escorces superior i inferior. Aquest aprimament litosfèric comporta una subsidència que provoca el desenvolupament dels solcs pirinencs que enllacen l'oceà Atlàntic amb la mar del Tetis, la predecessora de l'actual Mediterrània. S'ha calculat que l'escorça, que a l'interior de la placa ibèrica tenia uns 34 km de gruix, sota la conca de Bóixols n'hauria tingut 28, i sota la conca nord-pirinenca només 15. Tot i la importància de l'aprimament, en el domini que esdevindrà la serralada pirinenca no s'arribà a formar escorça oceànica, cosa que succeí a l'àmbit del golf de Biscaia. Aquesta variació de la quantitat d'extensió al llarg del domini pirinenc és deguda a la rotació levogira de la placa ibèrica.

Cap al final del Cretaci inferior (Albià, -105 Ma) i durant bona part del Cretaci superior la placa ibèrica s'individualitza totalment de l'eurasiàtica tot desplaçant-se lateralment en sentit levogir al llarg de la zona de falla nord-pirinenca, que es desenvolupà on la litosfera era més prima. Així, durant el Cretaci superior, la falla nord-pirinenca hauria estat el límit entre les plaques eurasiàtica i ibèrica. Seguint aquesta zona de falla es desenvolupen conques sedimentàries de reduïdes dimensions, però força profundes, on s'acumulen potents gruixos de sediments detrítics, anomenats *flysch*. En relació al gran aprimament sofert per la litosfera al llarg de la zona de la falla nord-piri-

nenca cal entendre el metamorfisme de gradient tèrmic elevat desenvolupat al voltant de -95 Ma. Aquest mínim gruix de l'escorça i el desplaçament lateral de la placa ibèrica respecte de l'eurasiàtica explicarien l'emplaçament, entre els materials cretacis d'aquesta zona, de les granulites i les lersolites, provinents respectivament de l'escorça inferior i del mantell superior. Al sud de la falla nord-pirinenca, sobre la placa ibèrica, s'atura l'activitat de les falles normals que delimitaven les conques durant el Cretaci inferior i els sediments, predominantment de plataforma carbonàtica, s'estenen per sobre d'aquelles falles, donant lloc a una única conca molt extensa. Durant tot aquest temps el domini pirinenc, tant sobre la placa ibèrica com al llarg de la falla nord-pirinenca, hauria estat submergit.

Durant el Cretaci superior (Campanià, voltants de -80 Ma), comença la convergència entre les plaques ibèrica i eurasiàtica, procés que dura fins al final de l'Oligocè (-25 Ma). És en aquesta etapa que es produeix la delaminació de l'escorça ibèrica. L'escorça superior de la placa ibèrica es desenganxa de la inferior i s'escata i s'apila, enclastant-se contra l'escorça eurasiàtica, com a resultat de la progressiva subducció de la litosfera ibèrica sota l'eurasiàtica.

A l'escorça superior, les falles que amb anterioritat havien actuat com a falles normals que delimitaven les conques sedimentàries, inverteixen els seus moviments i esdevenen encavalcaments, donant lloc a l'estructura compressiva d'encavalcaments, descrita a l'apartat anterior. A finals de l'Oligocè s'ha adquirit ja l'estructura que es pot observar avui. L'apilament dels mantells pirinencs és, doncs, un procés llarg, que dura uns 50 Ma. El progressiu apilament de mantells encavalcants fa que a partir de poc abans del límit entre el Cretaci i el Paleogen (Terciari inferior) comenci a emergir la serralada dels Pirineus. La formació de l'edifici d'encavalcaments comporta, doncs, una inversió del relleu, de manera que, d'una banda, allà on hi havia una conca sedimentària s'hi va aixecant una serralada; d'altra banda, i com a conseqüència en bona part del pes de la pila de mantells, la litosfera es flexiona i a ambdós costats de la serralada en procés d'aixecament es produeix una subsidència que dóna lloc a conques, justament allà on durant l'etapa anterior hi havia àrees relativament elevades i, fins i tot, en part emergides. Són les denominades conques d'avantpaís, la conca de l'Ebre al sud i la conca d'Aquitània al nord, en les que es dipositen els materials provinents del desmantellament erosiu de la serralada emergent. A mesura que progressa l'edificació de la serralada i es van formant nous encavalcaments, aquests van afectant les vores

Figura 3: Evolució estructural dels Pirineus. En un primer estadi, abans de la col·lisió, l'escorça del domini pirinenc va ser afectada per un sistema de falles extensives durant el Cretaci inferior, que evolucionà a un sistema de falles direccionals en els inicis del Cretaci superior. Durant el Cretaci superior, al domini pirinenc s'hi estenia una única conca que recobria les antigues conques del Cretaci inferior de més reduïdes dimensions i ben limitades per falles. La col·lisió s'inicià durant el Campanià (Cretaci superior) i es prolongà fins al Miocè inferior. Durant tot aquest temps l'escorça superior s'escatà i apilà mitjançant encavalcaments, mentre que l'escorça inferior de la placa ibèrica, juntament amb el mantell litosfèric, subduí per sota de la placa eurasiàtica. Al mateix temps, d'una àrea submergida es passà progressivament a una àrea emergida amb un relleu cada cop més enèrgic, el qual s'accentuà vigorosament durant els darrers estadis (Eocè superior-Miocè inferior) de l'estructuració pirinenca que coincideix amb l'apilament de les unitats de sòcol que avui afloren a la zona axial. Simultàniament amb l'aixecament de la serralada, el desmantellament d'aquestes unitats va donar lloc a potents acumulacions de conglomerats a la conca d'avantpaís de l'Ebre. Per tant, el límit sòcol-cobertora dibuixat a la part central de la serralada en el tall corresponent a l'estructura actual és un límit imaginari, que mai no ha existit. S'ha dibuixat només per donar una idea de la quantitat de material erosionat durant el procés d'aixecament de la serralada

EVOLUCIÓ DE LA SERRALADA PIRINENCA

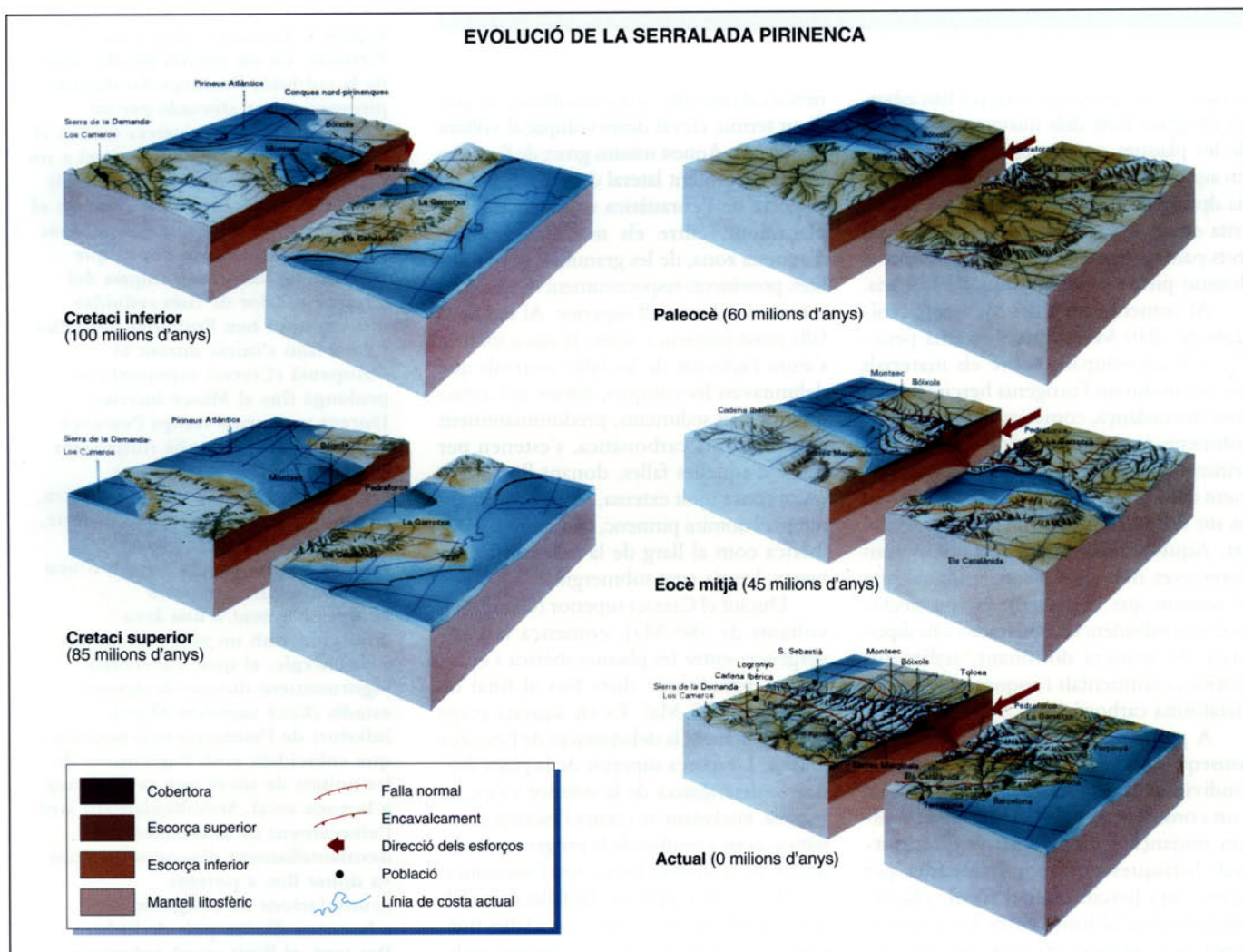


Figura 4: Blocs diagrames de l'evolució paleogeogràfica del domini pirinenc. Les reconstruccions paleogeogràfiques presentades estan basades en els talls restituïts en diferents moments de l'evolució dels Pirineus, presentats a la figura 3

(Font: Col·lecció didàctica de diapositives. La formació dels Pirineus. Servei Geològic de Catalunya, Departament de Política Territorial i Obres Públiques, Generalitat de Catalunya)

de les conques d'avantpaís, de manera que els marges d'aquestes, adjacents a la serralada, hi van quedant incorporats. Les àrees ocupades per les actuals conques de l'Ebre i d'Aquitània representen, doncs, només la localització d'aquestes conques en el seu estadi final.

Durant el procés d'aixecament de la serralada, la paleogeografia del domini pirinenc va dependre no només de la seva evolució estructural, sinó també de les oscil·lacions del nivell del mar. Així, durant el trànsit Cretaci-Terciari, hi hagué una emersió general del domini pirinenc, de manera que els sediments terrígens procedents del desmantellament de l'embrió de la serralada es dipositaven a les conques d'avantpaís, també emergides, donant lloc a les fàcies continentals conegudes amb el nom de garumianes. En aquells temps l'oceà Atlàntic quedà aïllat de la mar del Tetis, de la futura Mediterrània. A partir de l'Ilerdià -estatge basal de l'Eocè- (-55 Ma) i fins al final del Bartonian -Eocè superior- (-42 Ma), la conca de l'Ebre s'obria cap a l'Atlàntic. Tots els materials provinents de la serralada pirinenca eren transportats cap a l'oest per una xarxa fluvial desenvolupada en les terres emergides de la serralada i per corrents submarins en la

conca marina de l'Ebre. Els últims materials marins dipositats a la conca de l'Ebre són les sals potàssiques de Cardona i Navarra, d'edat priaboniana. L'estructuració del Pirineu occidental, a l'oest de Pamplona, va tancar la comunicació de la conca de l'Ebre amb l'Atlàntic, de manera que la conca de l'Ebre esdevingué endorreica i el seu rebliment continuà en règim continental. A diferència de la conca de l'Ebre, la conca d'Aquitània, la conca d'avantpaís septentrional, va romandre emergida des del començament del Terciari fins a l'actualitat. El progressiu rebliment de la conca endorreica de l'Ebre durant l'Oligocè va provocar que una bona part dels Pirineus meridionals quedés coberta per potents masses de conglomerats provinents del desmantellament de la serralada, especialment de l'apilament antiformal de mantells del sòcol, responsable de la creació del màxim relleu a les acaballes de la formació de la serralada. Aquest sepulcrament d'una serralada de col·lisió pels seus propis detritus és un cas excepcional i ha motivat que, un cop instal·lada la xarxa fluvial actual, hagin quedat preservades imponents masses conglomeràtiques, fet que fa dels Pirineus una serralada única, ja que permet d'observar de manera espec-



O. RIBA

tacular les relacions entre les estructures tectòniques i els materials que es dipositaven simultàniament amb el seu desenvolupament (materials sintectònics).

La formació del solc de València a les acaballes de l'Oligocè i durant el Miocè, i la de la Mediterrània occidental, va provocar la instal·lació d'una xarxa fluvial que erosionà les Cadenes Costaneres Catalanes i capturà la xarxa fluvial endorreica de la conca de l'Ebre. A partir d'aquest moment es pot considerar instal·lada, en els seus trets essencials, la xarxa fluvial actual. La conca de l'Ebre passà de ser una conca de sedimentació endorreica a una àrea sotmesa, a l'igual que la serralada pirinenca, a desmantellament. L'existència d'una superfície de rebliment hauria pogut facilitar l'encaixament de la xarxa fluvial als Pirineus meridionals tot travessant perpendicularment les principals estructures i alineacions muntanyoses actuals, com fan, per exemple, les dues Nogueres a través de la serra del Montsec.

La formació del relleu actual va ser afavorida per l'aixecament isostàtic de la serralada. Aquest aixecament és una conseqüència de l'escalfament progressiu de la litosfera subduïda durant la col·lisió, escalfament que encara s'està produint actualment i és el res-

ponsable de la fusió parcial de l'escorça inferior subduïda. Cal tenir present que l'acostament de plaques i la subducció són fenòmens molt més ràpids que no pas l'equilibrament tèrmic de la litosfera subduïda. No va ser, doncs, fins que la subducció s'aturà que l'escalfament per conducció fou prou efectiu per a reequilibrar tèrmicament els materials subduïts. Han calgut 25 Ma per arribar a l'estadi actual de fusió parcial de l'escorça inferior subduïda, l'escalfament de la qual provoca un descens de la densitat de l'edifici orogènic que es tradueix en el seu aixecament.

A manera de cloenda

Els Pirineus formen part de l'orogen pirinenc desenvolupat durant el cicle alpi al límit de les plaques ibèrica i eurasiàtica, a l'extrem occidental del sistema alpi. La serralada dels Pirineus, en sentit orogràfic, es va aixecar en el tram de l'orogen en què s'enfrontaren dues litosferes continentals durant l'etapa de convergència de les plaques esmentades. Els processos fonamentals que intervingueren en l'estructuració de la serralada foren la subducció de la litosfera ibèrica sota l'eurasiàtica, acompanyada de la delaminació de l'escorça superior, la qual s'estructurà mitjançant

Foto 7: Conglomerats sintectònics de la serra de Busa.

Els conglomerats dipositats als Pirineus durant l'estructuració tectònica de la serralada estan especialment ben preservats, fet que permet de conèixer amb precisió l'edat de formació de les estructures. Els conglomerats sintectònics es disposen formant ventalls com els de la serra de Busa, coneguts amb el nom de discordances progressives



escatament i apilament de mantells de corriments per donar lloc al ventall d'encavalcaments que caracteritza l'estructura dels Pirineus ístmics.

D'acord amb aquesta estructura i l'evolució geològica que implica, als Pirineus poden distingir-se, de sud a nord, les següents unitats:

- 1) La conca de l'Ebre, reblerta per dipòsits terciaris provinents del desmantellament de la serralada i que constitueix la conca d'avantpaís meridional dels Pirineus, sobre la que encavalquen les unitats meridionals de la serralada.
- 2) Els Pirineus meridionals, que es caracteritzen pels mantells de corriments dirigits cap al sud. S'estructuren en: 2.1) els mantells superiors, que constitueixen un sistema de mantells imbricats que afecten exclusivament la cobertura mesocenozoica i que en part corresponen a la cobertura d'algunes de les

unitats dels mantells inferiors, desenganxada i desplaçada cap al sud; i 2.2) els mantells inferiors, que afecten el sòcol hercinià i la cobertura i que formen un apilament antiformal, el qual permet l'ampli aflorament de sòcol hercinià seguint l'eix de la serralada, l'anomenada tradicionalment zona axial.

- 3) Separats de la unitat anterior per la falla nord-pirinenca, els Pirineus septentrionals es caracteritzen per una tectònica d'encavalcaments dirigits cap al nord, que afecta tant el sòcol com la cobertura i que representen un escurçament molt inferior al que comporta el sistema dels Pirineus meridionals.
- 4) La conca d'Aquitània, la conca d'avantpaís septentrional dels Pirineus, reblerta per dipòsits terciaris, que és encavalcada per les unitats septentrionals més externes.

Data de recepció de l'original: 01.95

Empezar sobre una base sólida



Cuando se están estableciendo las bases para la construcción de un edificio o autopista o de un sistema completo de información geográfica, se necesita una tecnología avanzada en topografía y cartografía. Existe un sistema suficientemente flexible que contiene una amplia gama de aplicaciones; una solución que resuelve todas las necesidades de captura de datos: INTERGRAPH.

Una base sólida para su proyecto

Para mejorar la eficacia en los proyectos o levantamientos para ingeniería, se requiere:

- Conexión con libretas electrónicas.
- Diseño parametrizado.
- Proyecto, simulación y cálculo de redes geodésicas.
- Modelos digitales del terreno.
- Aplicaciones para la implantación y diseño en ingeniería.
- Aplicaciones para cálculo y análisis de movimiento de tierras.

INTERGRAPH ofrece estas herramientas como parte de un sistema total e integrado, para la captura, gestión, análisis y presentación de información geográfica. Con INTERGRAPH, todos los ficheros relacionados con un proyecto forman parte de una base de datos única. La información compartida ayuda a los distintos departamentos a comunicarse adecuadamente, evitando la duplicación de datos, mejorando la productividad.

Un compromiso sólido de formación y asistencia

Para INTERGRAPH, la formación y asistencia al usuario son temas prioritarios. A partir del conocimiento de las tareas cotidianas en topografía e ingeniería, se consigue mejorar la productividad y la eficacia, introduciendo adecuadamente los gráficos interactivos. Este compromiso con el usuario ha convertido a INTERGRAPH en el líder mundial en cartografía asistida por ordenador. Empezar con INTERGRAPH supone establecer una base sólida, para cualquier proyecto en topografía, ingeniería o cartografía.

Un sistema único. Todas las soluciones.

Para más información, dirigirse a:
INTERGRAPH ESPAÑA, S.A.

C/. Gobelos, 47-49 LA FLORIDA
28023 MADRID Tel.: 91 - 372 80 17
EDIFICIO UNIBER c/. Aribau, 197-199
08021 BARCELONA Tel.: 93 - 200 52 99
c/. Las Mercedes, 8 48930 LAS ARENAS
GETXO (VIZCAYA) Tel.: 94 - 463 40 66