

3D Reconstruction and Modelling of the *Sierras Exteriores Aragonesas* (Southern Pyrenees, Spain)

Structural Evolution of the *Pico del Águila* anticline

Oskar Vidal Royo

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tdx.cat) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tdx.cat) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tdx.cat) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

RESUM EXTENS

Evolució estructural de l'anticlinal del Pico del Águila mitjançant modelització estructural 3D, analògica i numèrica

R.1 SINOPSI

La present Tesi pretén construir un model conceptual unificat de l'evolució estructural de l'anticlinal del Pico del Águila (Sierras Exteriores Aragonesas, Pirineus Meridionals) a partir de la integració de diverses tècniques de modelització geològica. El Pico del Águila és un exemple ben conegut de plec de desenganxament, caracteritzat per una tendència estructural N-S, paral·lela a la direcció de transport tectònic als Pirineus Meridionals.

Construït a partir de dades de camp i interpretació de perfils sísmics es presenta un model tridimensional de l'estructura del Pico del Águila, posant de manifest els trets geomètrics de l'anticlinal, amb especial èmfasi en la interferència entre les estructures N-S i les E-W, així com en la geometria dels estrats de creixement.

En base a observacions de camp d'una distribució irregular del nivell basal de desenganxament es realitzaren una sèrie de models analògics que mostren com es poden generar estructures perpendiculars a l'orogen que poden finalment donar lloc a anticlinals perpendiculars a la tendència estructural general de la serralada.

Els models numèrics presentats investiguen l'efecte d'una estratigrafia mecànica complexa, caracteritzada per la intercalació de unitats amb marcades diferències de competència, així com el rol de la sedimentació sin-cinemàtica en el creixement d'un plec de desenganxament.

A partir del model 3D anteriorment esmentat es presenta també una restitució seqüencial geomecànica de l'estructura que suggereix la coexistència de múltiples mecanismes de plegament produint-se simultàniament en diferents unitats i dominis estructurals del plec. Aquesta superposició de mecanismes produeix una distribució complexa de la deformació que difícilment pot ser avaluada mitjançant models cinemàtics bidimensionals.

Integrant els models presentats amb dades prèvies de la regió, hom discuteix els beneficis i inconvenients de cadascuna de les tècniques de modelització i es presenta un model integrat d'evolució estructural de l'anticlinal del Pico del Águila, el qual ens permet una millor comprensió de l'estructura així com dels processos que menaren l'evolució dels plecs de desenganxament N-S de les Sierras Exteriores Aragonesas.

R.2 MOTIVACIÓ, OBJECTIUS I ORGANITZACIÓ DE LA TESI

R.2.1 MOTIVACIÓ

Una de les principals motivacions per realitzar aquesta Tesi va ser la de investigar els mecanismes que governen la formació de plecs de desenganxament en 3D. A més, es disposava del que pot ser considerat un dels millors laboratoris naturals del planeta per estudiar la geologia estructural en contextos compressius: les Sierras Exteriores Aragonesas dels Pirineus Meridionals. La geologia de les Sierras Exteriores es caracteritza per trets ben particulars que després de dècades d'estudi segueixen sent objecte de treballs i discussions geològiques quant als processos que menaren la seva formació i

evolució es refereix. En aquest sentit, els anticlinals N-S de les Sierras Exteriores tenen una gran rellevància geològica i requerien de noves metodologies d'estudi per abordar els aspectes que romanien (i alguns d'ells encara romanen) poc coneguts. Les excel·lents condicions d'aflorament, l'alt grau de preservació de les estructures i la fàcil accessibilitat van fer d'aquesta àrea el lloc adient per testar i aplicar les tècniques de reconstrucció estructural i modelització més noves desenvolupades en el si de l'Institut de Recerca Geomodels i del Grup de Geodinàmica i Anàlisi de Conques (GGAC-UB) de la Universitat de Barcelona. En aquest estadi primerenc de la memòria de Tesi es creu necessari reconèixer emfàticament el gran esforç, el treball dur i l'entusiasme de tot el personal del GGAC, en especial dels professors J.A Muñoz i Stuart Hardy, que van obrir camí en les tècniques de Modelització Estructural 4D i Modelització Mecànica d'estructures, de les quals aquesta Tesi se n'ha beneficiat en gran mesura. Es pot dir que aquesta tessitura inicial va ser un punt de partida prometedor que va constituir, per si mateix, una important motivació addicional.

Com s'ha dit, els processos que originaren els anticlinals N-S de les Sierras Exteriores són encara objecte d'estudi i discussió. L'estructura és complexa, i els mecanismes que hi van tenir lloc són múltiples i difícils d'abordar per mètodes senzills. Tanmateix, les Sierras Exteriores presenten immillorables facilitats per quant a grau d'exposició i accessibilitat es refereix. Això significa que els anticlinals N-S de les Sierras Exteriores, i en particular el Pico del Águila, poden ser considerats exemples aflorants de primer ordre mundial de plects de desenganxament amb sedimentació marina a fluvio-deltaica associada. Una bona comprensió dels processos, mecanismes i paràmetres que van tenir lloc en l'evolució d'aquestes estructures pot aportar doncs una millor comprensió sobre la formació i evolució d'estructures formades sota condicions similars en altres parts de la Terra, en les que la pobre qualitat de les dades o la difícil accessibilitat poden comprometre la veracitat dels resultats i portar a error en la interpretació dels trets geològics que caracteritzen l'estructura. A més, si aquestes estructures són altament preuades per contenir hidrocarburs o altres recursos naturals explotables comercialment, una bona comprensió de la seva geometria, evolució i trets característics pot tenir un gran impacte econòmic en termes d'exploració i producció dels

possibles reservoris. Aquest podria ser el cas, per citar uns pocs exemples, dels cinturons de plecs i encavalcaments d'aigües profundes del Mississipi fan i Perdido (Mitra, 2002; Camerlo & Benson, 2006), o del cinturó de Papua Nova Guinea (Hill, 1991; Mitra, 2002), entre d'altres.

R.2.2 OBJECTIUS

La present Tesi es centra en la generació, evolució estructural i relacions tecto-sedimentàries dels anticlinals N-S de les Sierras Exteriores Aragonesas, i més precisament, de l'anticlinal del Pico del Águila. Aplicant diferents tècniques de modelització pretenem donar resposta a diverses preguntes nascudes de l'observació dels trets geològics de les Sierras Exteriores, i que creiem que poden ser esteses a altres exemples de plecs de desenganxament descrits en altres parts del món. Els objectius específics són:

- 1) Conèixer els mecanismes que poden donar lloc a la generació de estructures perpendiculars a l'orogen tals com l'anticlinal del Pico del Águila en absència de cap altre esdeveniment d'escurçament que no sigui la compressió de l'orogènia alpina, de direcció de transport tectònic N-S.
- 2) Millorar la comprensió de com es distribueix la deformació al llarg d'una seqüència estratigràfica heterogènia com la descrita a les Sierras Exteriores i, per tant, com s'acomoda la deformació depenent de les propietats mecàniques de cada unitat.
- 3) Comprendre el paper de la sedimentació sin-cinemàtica (estrats de creixement) en l'evolució del plec i com acomoda la deformació.
- 4) Conèixer els mecanismes que governen la formació dels plecs de desenganxament en 3D i entendre com es distribueixen al llarg i ample de l'estructura. Al mateix temps, comprendre com la distribució dels mecanismes de plegament afecta la geometria de l'anticlinal i les taxes de sedimentació i aixecament que, al seu torn, també influeixen el creixement de l'anticlinal.
- 5) Presentar un model unificat d'evolució estructural d'acord amb les observacions i estudis previs i amb els resultats obtinguts a partir de diferents eines de modelització.

- 6) Contribuir a un millor coneixement sobre la cinemàtica i la mecànica dels plecs de desenganxament per aconseguir una millor interpretació i comprensió d'altres estructures anàlogues al llarg del planeta que no exhibeixin unes condicions d'aflorament i accessibilitat tant favorables com les de l'anticlinal del Pico del Águila.

R.2.3 ORGANITZACIÓ DE LA TESI

Aquesta Tesi es presenta com una compilació de quatre publicacions científiques, i s'ha estructurat en sis capítols principals, organitzats de la següent manera:

El **Capítol I** presenta una descripció general de la geologia de les Sierras Exteriores Aragonesas dels Pirineus Meridionals. Els articles científics tenen una extensió limitada dins la qual només es pot encabir una breu descripció dels trets més essencials de la geologia de la regió. Tanmateix, l'àrea d'estudi es caracteritza per nombrosos trets geològics d'importància que no van ésser esmentats a les publicacions o que es troben disseminats en l'apartat del marc geològic de cadascun dels articles. En aquesta secció mirem de presentar una descripció global d'aquests aspectes que creiem importants per tenir un millor coneixement global de l'àrea d'estudi. Es posa especial èmfasi en la descripció de l'estratigrafia, donada la seva importància en l'evolució dels anticlinals N-S, i en els trets estructurals generals de la regió.

El **Capítol II** conté el primer article científic de la Tesi: **Vidal-Royo, O., Koyi, H.A., Muñoz, J.A., 2009. Formation of orogen-perpendicular thrusts due to mechanical contrasts in the basal décollement in the Central External Sierras (Southern Pyrenees, Spain). Journal of Structural Geology, 31 (5), 523-539.**

Aquest article presenta dues sèries de models analògics (Sèries A i B) que s'han utilitzat per investigar l'efecte de les irregularitats mecàniques en el nivell

basal de desenganxament (fàcies Muschelkalk i Keuper) en la formació d'estructures obliques i perpendiculars a l'orogen, tals com els anticlinals N-S de les Sierras Exteriores Aragonesas. La sèrie A de models investiga la proporció de gruix estratigràfic entre la cobertora i el nivell de desenganxament, mentre que la sèrie B de models testa l'amplada (perpendicular a la direcció d'escurçament) del desenganxament friccional.

El **Capítol III** conté el segon article científic que constitueix aquesta Tesi: **Vidal-Royo, O., Hardy, S., Muñoz, J.A., 2010. The roles of complex mechanical stratigraphy and syn-kinematic sedimentation in fold development: Insights from discrete-element modelling and application to the Pico del Águila anticline (External Sierras, Southern Pyrenees). In: Poblet, J., Lisle, R.J. (Eds.). Kinematic Evolution and Structural Styles of Fold-and-Thrust Belts, Special Publication of the Geological Society, *acceptat*.**

En aquest estudi es presenten dos models numèrics en 2D, basats en el mètode de Modelització d'Elements Discrets, per tal d'investigar l'efecte de una estratigrafia mecànica complexa com la descrita al camp així com dels estrats de creixement en l'evolució de l'anticlinal del Pico del Águila. Es presenten dos models: el Model 1 explora la resposta d'aquesta estratigrafia mecànica complexa a l'escurçament sota condicions que porten a la formació d'un plec de desenganxament; el Model 2 investiga l'efecte de la sedimentació sin-cinemàtica sota les mateixes condicions de contorn que el Model 1.

Al **Capítol IV** es presenta la tercera publicació científica d'aquesta Tesi: **Vidal-Royo, O., Cardozo, N., Muñoz, J.A., Hardy, S., Maerten, L., (in press). Multiple mechanisms driving detachment folding as deduced from 3D reconstruction and geomechanical restoration: The Pico del Águila anticline (External Sierras, Southern Pyrenees). *Enviat a Basin Research*.**

Aquest estudi presenta una reconstrucció i restitució geomecànica tridimensional de l'anticlinal del Pico del Águila. A partir de dades de camp (mesures de cabussament i cartografia de traces geològiques) i interpretació de perfils sísmics es presenta una acurada reconstrucció de la geometria de la seqüència pre-plegament i dels estrats de creixement. Mercès a la reconstrucció de quatre seqüències deposicionals dins del paquet sedimentari sin-plegament, es va poder realitzar una restitució seqüencial de l'estructura en la que es va poder establir una cronologia de la deformació. Basat en un mètode de Modelització d'Elements Finites, l'algoritme de restitució considera les propietats mecàniques de les roques per portar a terme una restitució en la que no s'assumeix ni s'imposa cap criteri cinemàtic previ. A partir d'aquesta restitució s'han pogut obtenir nous coneixements de l'evolució de l'anticlinal en 3D.

El **Capítol V** conté el quart article científic d'aquesta Tesi: **Vidal-Royo, O., Muñoz, J.A., Hardy, S., Koyi, H.A., Cardozo, N., (in press). Structural evolution of the Pico del Águila anticline (External Sierras, Southern Pyrenees) derived from sandbox, numerical and 3D structural modelling techniques. *Enviat a Geologica Acta.***

Aquest capítol conté un resum dels resultats presentats en els capítols previs, així com la discussió general de la Tesi. En aquest capítol discutim sobre els beneficis, desavantatges, limitacions i idoneïtat de les tècniques de modelització presentades, així com els resultats dels models i la seva integració en un model unificat d'evolució estructural.

Al **Capítol VI** es presenten les conclusions finals d'aquesta Tesi, així com una llista de tasques futures per portar a terme després de la defensa.

R.3 INTRODUCCIÓ

Els models geològics proporcionen explicacions i ajuden a un millor coneixement dels processos geològics que tenen lloc a la Terra. Tanmateix, en la majoria dels casos els models geològics no han de ser entesos com una rèplica de la natura sinó com una manera de simular i representar els processos geològics a una escala de temps observable per l'ésser humà.

La geologia estructural té ja una llarga tradició en l'ús de la modelització com a eina per millorar l'enteniment de la generació i evolució d'estructures. D'ençà els primers experiments de models analògics de sorra ([Hall, 1815](#); [Daudre, 1879](#); [Cadell, 1888](#); entre d'altres) s'han creat i desenvolupat nombroses tècniques en resposta a la necessitat creixent dels geòlegs de donar explicació a nous problemes i situacions. Els models analògics han esdevingut més sofisticats, incorporant elements i dispositius que produeixen resultats quantitius per comparar amb la natura ([Koyi, 1997](#)). Amb l'aparició i ús generalitzat dels ordinadors els models numèrics van aparèixer, contribuint amb una ràpida solució d'algoritmes matemàtics que implicà grans avenços en la comprensió dels processos geològics ([Krumbein and Graybill, 1965](#); [Agterberg, 1967](#); [Harbaugh and Merriam, 1968](#)). En aquest sentit, els models numèrics afegiren un control quantitiu de les lleis i paràmetres que governen els processos naturals.

Malgrat tots aquests avenços, cada tècnica de modelització presenta els seus propis punts forts, febleses i limitacions, portant doncs a una representació de la natura relativament simplificada o incompleta. Això fa que cada tècnica sigui adient per determinades finalitats, tenint en compte que conèixer les limitacions de cada tècnica és essencial per comprendre correctament l'aportació dels models geològics. Per aquest motiu, darrera de cada model ha d'haver-hi una sèrie de paràmetres físics per testar, o un conjunt de processos copsables per esclarir, més que no pas un intent de reproduir detalladament el que s'ha descrit en la natura.

En aquesta Tesi es presenten tres tècniques de modelització per millorar el coneixement sobre l'evolució estructural dels anticlinals N-S de les Sierras

Exteriores Aragonesas dels Pirineus Meridionals. Entre ells, el Pico del Àguila ha estat l'objecte d'estudi donat que és una estructura àmpliament coneguda com a exemple de plec de desenganxament, és fàcilment accessible i té un excel·lent grau de preservació i aflorament. A més, el mapa geològic del Pico del Àguila pot ser considerat una secció al llarg de l'eix del plec, mostrant la geometria i distribució de les unitats al llarg de l'estructura. Els plecs N-S de les Sierras Exteriores Aragonesas es caracteritzen per una interferència estructural amb les estructures E-W generals dels Pirineus, i mostren un alt grau de preservació dels estrats de creixement, fet que permet registrar de forma precisa l'evolució de la deformació a l'anticlinal. L'estructura és ben coneguda i s'ha estudiat des de moltes perspectives diferents. S'han fet contribucions sobre la cinemàtica i evolució estructural del plec a partir d'estudis sedimentològics (Millán et al., 1994; Castelltort et al., 2003), paleomagnetisme (Pueyo et al., 2002; Rodríguez-Pintó et al., 2008), models analògics (Nalpas et al., 1999, 2003), models cinemàtics 2D (Poblet and Hardy, 1995; Poblet et al., 1997), restitució de talls geològics (Novoa et al., 2000), i altres estudis multidisciplinaris (Huyghe, et al., 2009). Malgrat aquest nombre d'estudis previs, no existeix cap estudi integrat posant en comú els resultats derivats de diverses tècniques de modelització i anàlisi que es complementin i validin mútuament, construint així un model d'evolució més robust.

Aquests motius fan del Pico del Àguila una estructura ideal per reconstruir en 3D. En aquest estudi es presenta en primer lloc el model 3D de l'anticlinal, a partir del qual s'ha obtingut la geometria del patró d'interferència entre les estructures N-S i E-W, així com la geometria dels estrats de creixement. Més que proporcionar respostes sobre la evolució del plec, el model 3D planteja noves preguntes sobre els processos geològics que van tenir-hi lloc. Per donar-hi resposta s'han emprat tres tècniques de modelització que es presenten a continuació de la reconstrucció 3D del plec. En conjunt, aquest treball pretén elaborar un model conceptual unificat d'evolució estructural basat en la integració dels resultats obtinguts a partir de models analògics (Vidal-Royo et al., 2009), models mecànics 2D (Vidal-Royo et al., 2010), i restitució geomecànica 3D de l'anticlinal del Pico del Àguila (Vidal-Royo et al., *enviat*). Els models analògics presentats mostren la formació d'estructures perpendiculars a

l'orogen en un únic esdeveniment compressiu, com a conseqüència d'importants contrastos mecànics en el nivell basal de desenganxament. Els models numèrics investiguen la importància de l'estratigrafia mecànica i la sedimentació sin-cinemàtica en el creixement d'un plec de desenganxament com el Pico del Águila. Finalment, la restitució geomecànica 3D mostra la complexitat de la interferència en l'estructura de l'anticlinal, així com la seva evolució seqüencial i la combinació de mecanismes de plegament produint-se simultàniament durant el creixement del plec.

R.4 MARC GEOLÒGIC

La geologia de les Sierras Exteriores Aragonesas és ben coneguda i ha estat objecte de nombrosos estudis al llarg dels anys. Una descripció detallada dels trets geològics de la regió va més enllà dels objectius d'aquest resum, tot i que el lector interessat podrà trobar bones i profundes descripcions en treballs clau com són [Puigdefàbregas \(1975\)](#), [Millán et al. \(1994\)](#), i [Pueyo et al. \(2002\)](#). Malgrat això, una descripció general de la regió es presenta també en aquesta secció.

L'anticlinal del Pico del Águila es localitza en les denominades Sierras Exteriores Aragonesas dels Pirineus Meridionals. Les Sierras Exteriores Aragonesas estan constituïdes per una sèrie de làmines d'encavalcament imbricades, desenganxades sobre les fàcies evaporítiques, calcàries i dolomítiques del Triàsic mig i superior (fàcies Muschelkalk i Keuper) ([Soler & Puigdefàbregas, 1970](#); [IGME, 1992](#); [Millán et al. 1994](#); [Millán, 1995](#); [Pueyo et al., 2002](#)). Les Sierras Exteriores constitueixen la part frontal emergent de l'encavalcament sudpirinenc, i es troben desplaçades cap al sud sobre els sediments d'edat terciària de la conca d'avantpaís de l'Ebre.

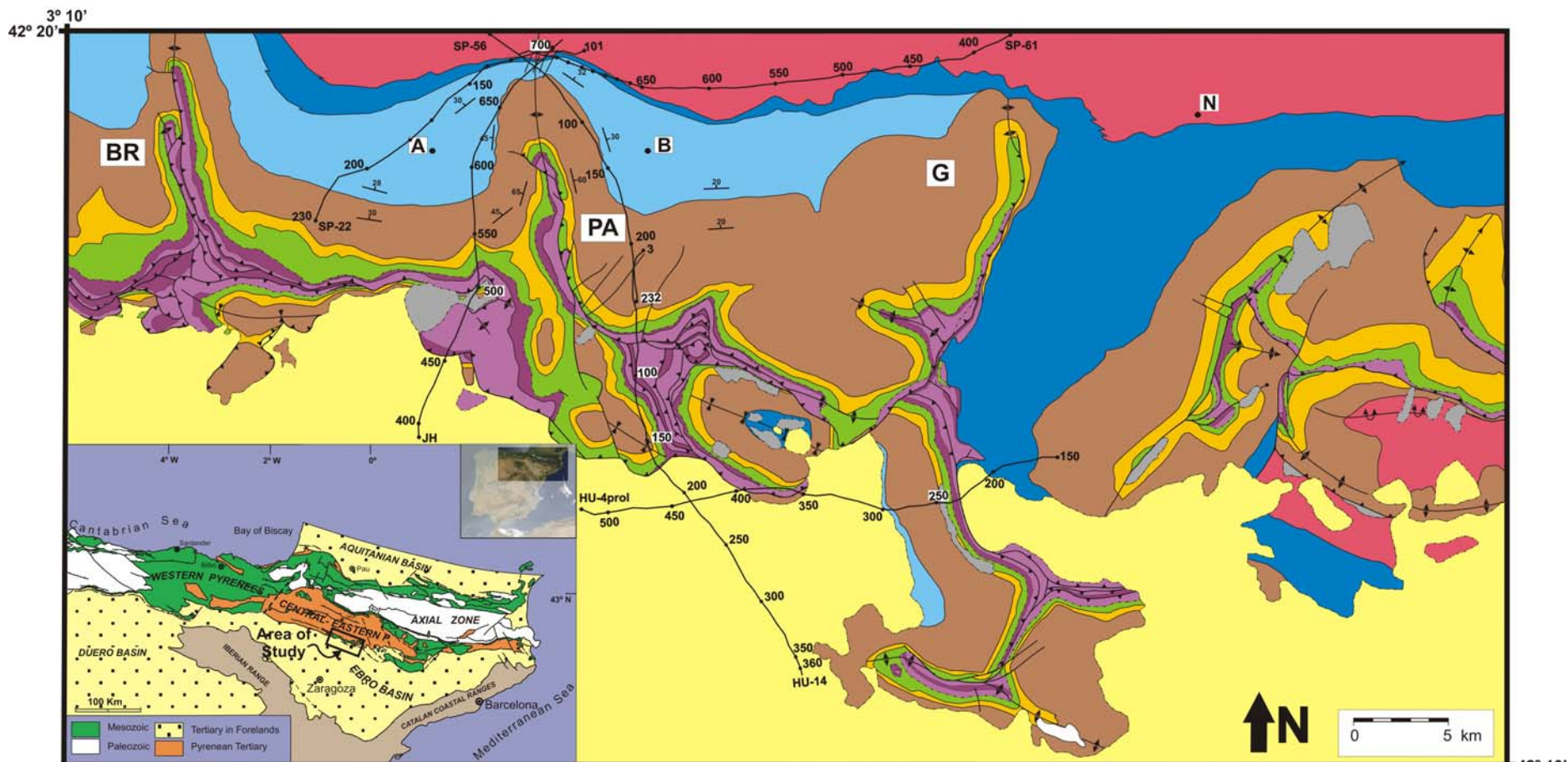
Una de les peculiaritats de les Sierras Exteriores és la presència d'un conjunt d'anticlinals amb orientació axial N-S a NW-SE. Aquestes estructures són, doncs, perpendiculars a la tendència estructural general dels Pirineus (E-W, amb la direcció de transport tectònic cap al sud) i creen per tant un patró de

interferència estructural complex (Fig. R1). Els anticlinals N-S són més joves i més petits cap a l'oest (Millán et al., 1994; Millán, 1995) i el seu creixement va ser sincrònic a la deposició del sediments de l'Eocè mig a l'Oligocè i al desenvolupament del front d'encavalcament sudpirinenc (actiu fins al Miocè inferior; Puigdefàbregas, 1975; Holl and Anastasio, 1993; Millán et al., 1994; Millán, 1995).

El Pico del Águila és un dels anticlinals N-S més estudiats de totes les Sierras Exteriores Aragonesas. Va créixer durant el període comprès entre 42.67 ± 0.02 Ma (Lutecià superior) i 34.8 ± 1.72 Ma (Priabonià mig) (Poblet & Hardy, 1995), i mostra una espectacular seqüència d'estrats de creixement (Figs. R3 i R4) (Millán et al., 1994; Millán, 1995; Poblet & Hardy, 1995; Pueyo et al., 2002; Castelltort et al., 2003; Vidal-Royo et al., 2010).

La seqüència estratigràfica de les Sierras Exteriores Aragonesas es caracteritza per ser una intercalació de materials competents i incompetents (Millán et al., 1994), cadascú dels quals mostra una diferent resposta a la deformació (Vidal-Royo et al., 2010). L'estratigrafia de la zona consisteix en unes centenes de metres de materials mesozoics coberta per una seqüència més gruixuda de materials terciaris (Fig. R2). La sèrie mesozoica està composta per calcàries, dolomites i argiles amb evaporites del Triàsic mig i superior, cobertes per les calcàries de plataforma somera del Cretàcic superior. El Terciari està compost pels gresos, limolites i calcàries lacustres de la transició Cretàcic-Terciari (fàcies del Garumnià), les calcàries de la plataforma marina somera de la Formació Guara (Lutecià), les margues, calcàries i gresos deltaics de plataforma marina i transicionals de les Formacions Arguis i Belsué-Atarés (Lutecià superior a Priabonià mig), i les argiles, gresos i conglomerats fluvials de la Formació Campodarbe (Priabonià mig a Oligocè mig).

La seqüència pre-plegament comprèn materials que van del Triàsic al Lutecià, amb el límit superior al sostre de la seqüència deposicional 2 de la Formació Guara. Dins del nivell de desenganxament Triàsic, observacions de camp (IGME, 1992) indiquen que les calcàries i dolomites del Muschelkalk (Triàsic mig) són les roques més antigues que afloren al nucli de l'anticlinal (Fig. R1), trobant-se plegades, encavalcades i amb una gran deformació interna.



- | | | | | |
|----------------------------------|--|--|--|--|
| Undifferentiated recent deposits | Late Oligocene-Miocene conglomerates (Uncastillo Fm) | Priabonian-Stampian fluvial sandstones (Campodarbe Fm) | Priabonian deltaic sandstones (Belsué-Atarés Fm) | Bartonian marls and sandstones (Arguis Fm) |
| Lutetian limestones (Guara Fm) | Cretaceous-Paleocene transit siltstones (Garumnian) | Upper Cretaceous limestones (Adraén Fm) | Triassic evaporites (Keuper facies) | Triassic dolomites (Muschelkalk facies) |

42° 10'
3° 30'

Fig. R1. (PÀGINA ANTERIOR) Mapa geològica del sector central de les Sierras Exteriores Aragonesas (modificat de IGME, 1992). BR: anticlinal de Bentué de Rasal; PA: anticlinal del Pico del Águila; G: anticlinal de Gabardiella. Les línies negres indiquen els perfils sísmics interpretats en la reconstrucció 3D de l'anticlinal del Pico del Águila.

Per altra banda, malgrat que les argiles i evaporites del Keuper (Triàsic superior) dibuixen la geometria del plec com la resta de la seqüència mesozoica, s'ha observat un notable decreixement del gruix estratigràfic cap a les parts internes de l'anticlinal, on les fàcies Keuper són pràcticament inexistentes en el nucli de l'estructura (Fig. R1). D'aquesta manera, les fàcies Keuper són més gruixudes i estan millor exposades a les àrees entre els anticlinals N-S més que no pas al nucli d'aquestes estructures. La seqüència sin-plegament comprèn des de la seqüència deposicional 3 de la Formació Guara (Fig. R3) i la seqüència de somerització formada per les Formacions Arguis, Belsué-Atarés i Campodarbe. La base de la Formació Arguis defineix una discordança regional, indicant un canvi bruscat cap a ambients deposicionals de talús (Figs R2 i R4). [Millán et al., 1994](#) va definir quatre seqüències deposicionals principals dins de les Formacions Arguis i Belsué-Atarés. La seqüència I (anomenada GS-I a partir d'ara) està composta per margues blaves i margues sorrenques amb important contingut en glauconita, i té una edat compresa entre el Lutecià superior i el Bartonianà inferior. Aquesta seqüència s'aprima cap a la cresta de l'anticlinal i desapareix sense arribar a cobrir-la. La seqüència II (anomenada GS-II a partir d'ara) té una edat de Bartonianà mig a superior, i està composta per margues blaves lleugerament bioturbades. La seqüència III (anomenada GS-III a partir d'ara) correspon a una plataforma de pectínids d'edat Priabonianà inferior formada per margues blaves riques en contingut fòssil marí i amb traces de bioturbació. La seqüència IV (anomenada GS-IV a partir d'ara) és d'edat priaboniana inferior i està composta per margues sorrenques deltaiques i nivells siliciclàstics purs formats per progradació deltaica. El límit inferior de la GS-IV correspon al contacte entre les Formacions Arguis i Belsué-Atarés. El límit superior és una discordança regional, reconeixible tot al llarg de la conca sudpirinenca, i que correspon al contacte entre les Formacions Belsué-Atarés i Campodarbe (Fig. R2). Aquesta discordança representa un trànsit bruscat a ambients deposicionals continentals.

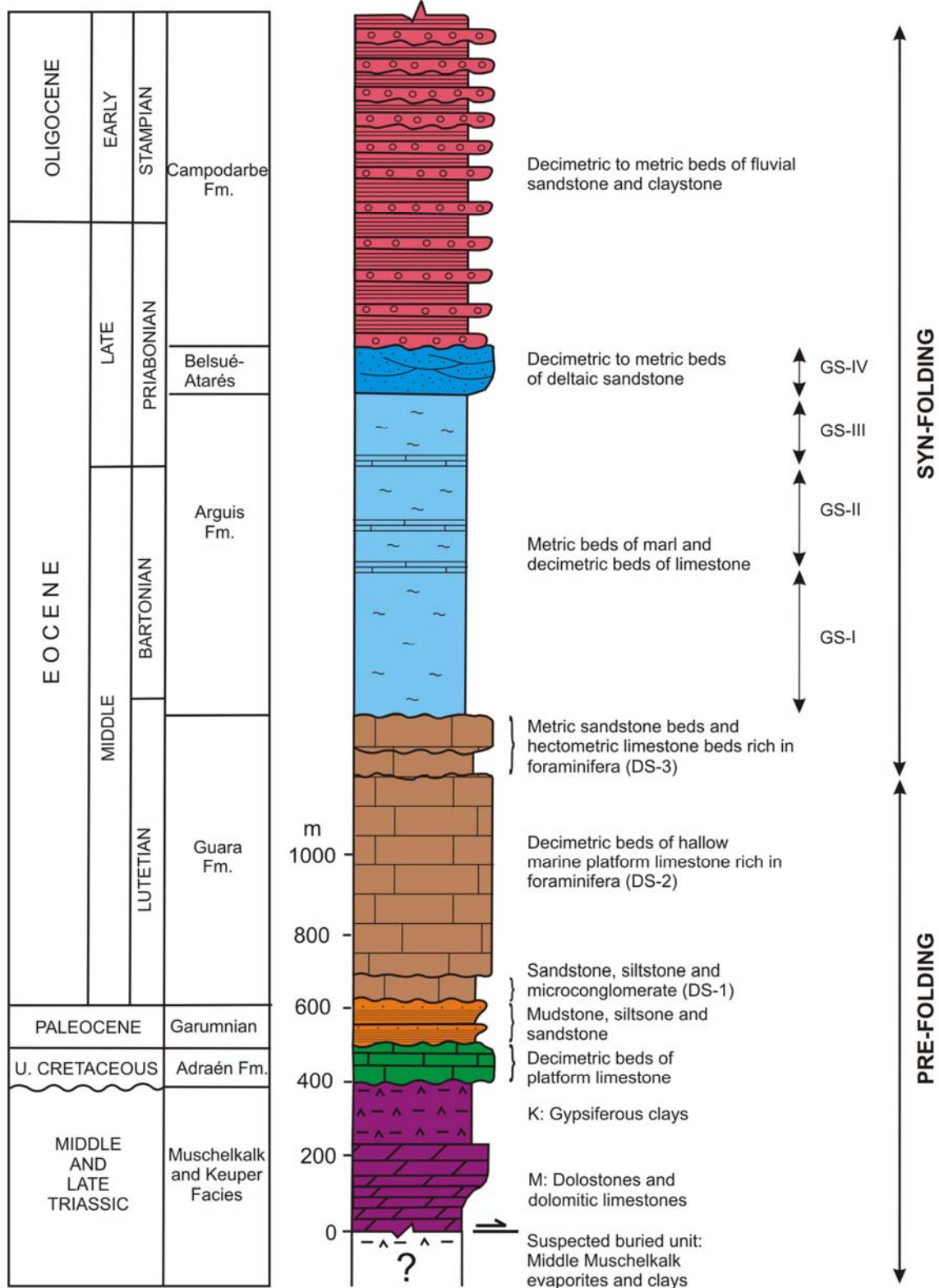


Fig. R2. Columna estratigràfica de la regió, descrivint les litologies i gruixos promig dels materials aflorants. M: fàcies Muschelkalk; K: fàcies Keuper. DS: seqüències deposicionals definides a la Formació Guara. GS: seqüències deposicionals definides als estrats de creixement. Modificada de Millán et al. (1994).

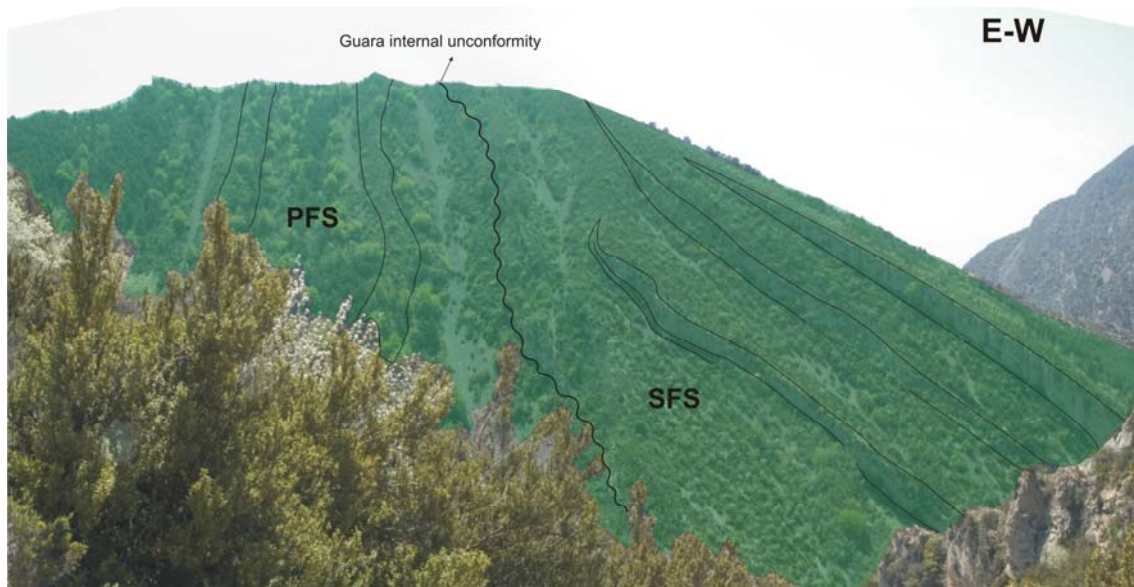


Fig. R3. Fotografia obliqua del flanc occidental de l'anticlinal del Pico del Àguila mostrant una discordança interna a la Formació Guara que separa a seqüència pre-plegament (PFS) de la seqüència sin-plegament (SFS), la qual s'aprima clarament sobre l'anterior.

R.5 RECONSTRUCCIÓ 3D DE L' ANTICLINAL DEL PICO DEL ÀGUILA

R.5.1 METODOLOGIA DE RECONSTRUCCIÓ

La reconstrucció de l'anticlinal del Pico del Àguila es basa en un acurat treball de camp amb recollida de dades de superfície i en la interpretació de diversos perfils sísmics (veure Fig. R1 per identificació i localització dels perfils). Totes aquestes dades van ser posteriorment integrades en un entorn de treball GIS (3D) . Això va donar com a resultat un model més robust, que incorpora totes les dades i mesures disponibles. Les dades adquirides en superfície comprenen mesures de cabussament, traces cartogràfiques de falles i fractures i una acurada cartografia de traces d'estratificació de la seqüència d'estrats de creixement. Aquestes dades es van posicionar en 3D sobre un Model Digital del

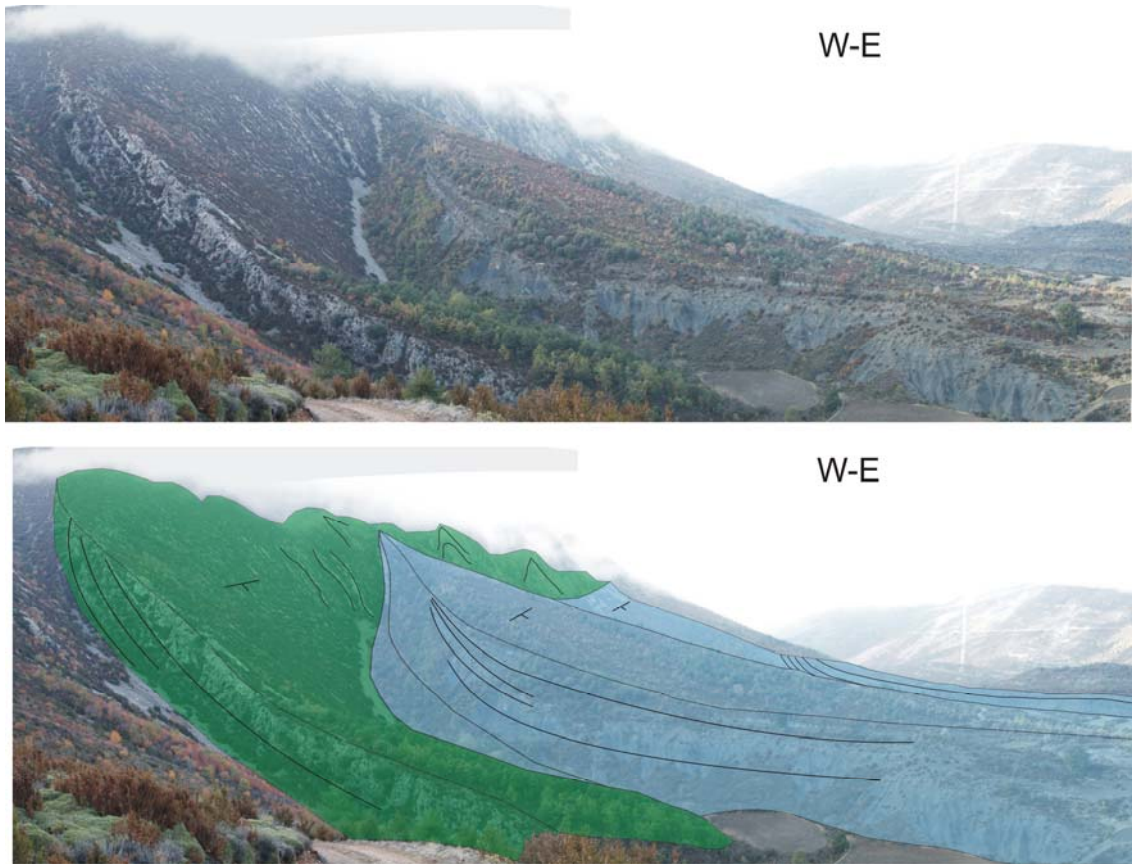


Fig. R4. Fotografia obliqua del flanc oriental del Pico del Águila. Es pot observar clarament com les margues de la Formació Arguis (en blau) s'aprimen i dibuixen *onlaps* sobre el sostre de la Formació Guara (en verd).

Terreny (MDT) de l'àrea amb una resolució de ± 2.5 m (Fig. R5). L'anticlinal es va reconstruir aplicant el Mètode dels Dominis de Cabussament (Fernández et al., 2004 a i b), el qual enuncia que la geometria d'una estructura es pot simplificar en volums en els quals l'orientació de l'estratificació és constant (Fig. R6). Per aplicar el mètode s'ha d'establir prèviament un model geomètric a partir de les dades disponibles. Aquest model geomètric ha d'incloure: 1) una definició dels dominis de cabussament (orientació promig de l'estratificació del domini i polaritat, posició i extensió dels límits del domini); i 2) una definició de les geometries estratigràfiques en 3D (un model de separacions estratigràfiques entre diferents horitzons). En total es van definir 91 dominis de cabussament per la reconstrucció del sostre de la Formació Guara, assumint una variació de

$\pm 5^\circ$ en l'azimut i $\pm 3^\circ$ en el valor del cabussament com a límits de tolerància entre dominis de cabussament. Intersectant els dominis de cabussament adjacents es va obtenir el mapa de contorns estructurals en 3D. A partir d'aquest es va realitzar una interpolació dels contorns estructurals a GOCAD (Paradigm™), obtenint una geometria més suavitzada de la superfície de referència que incorpora i respecta totes les dades d'entrada. La resta de les superfícies de la seqüència pre-plegament van ser reconstruïdes emprant una eina disponible a 3DMove (Midland Valley Exploration) que permet la creació de noves superfícies plegades a partir d'una superfície preexistent per plecs similars i paral·lels. Donat que el Pico del Àguila és considerat un plec paral·lel d'escala quilomètrica (Millán, 1995), l'eina de creació de superfícies plegades va ser emprada per reconstruir la geometria de les superfícies del sostre del Triàsic, Cretaci superior i Garumnià. Les superfícies de la seqüència sin-plegament van ser reconstruïdes individualment, aplicant el Mètode dels Dominis de Cabussament. Per controlar la variació de gruix estratigràfic dels estrats de creixement es va aprofitar l'excel·lent grau d'aflorament d'aquestes unitats al camp així com les columnes estratigràfiques detallades publicades a Millán et al. (1994).

Les dades de profunditat consisteixen en la interpretació de diversos perfils sísmics, la identificació i localització dels quals pot trobar-se a la Fig. R1. Aquests han permès conèixer la geometria de l'anticlinal en profunditat i validar les interpretacions a partir de dades de camp. Donada la pobra qualitat dels perfils sísmics, només s'han pogut interpretar els trets geomètrics generals de la seqüència pre-plegament, així com la geometria de l'encavalcament frontal sudpirinenc. Les interpretacions sísmiques es van convertir llavors a profunditat utilitzant la velocitat d'interval de cada unitat, deduïda a partir d'un pou d'exploració situat fora de l'àrea d'estudi i dels *Common Depth Points* (CDP's) dels perfils sísmics. Aquesta informació es va transferir a l'entorn de treball 3D, per tal de correlacionar els horitzons entre els diferents perfils interpretats. Es va generar llavors un mapa de contorns estructurals en 3D per cada falla o horitzó. En el cas dels horitzons estratigràfics pre-plegament, les noves dades es van afegir com a punts de control en profunditat a cada corresponent mapa de contorns.

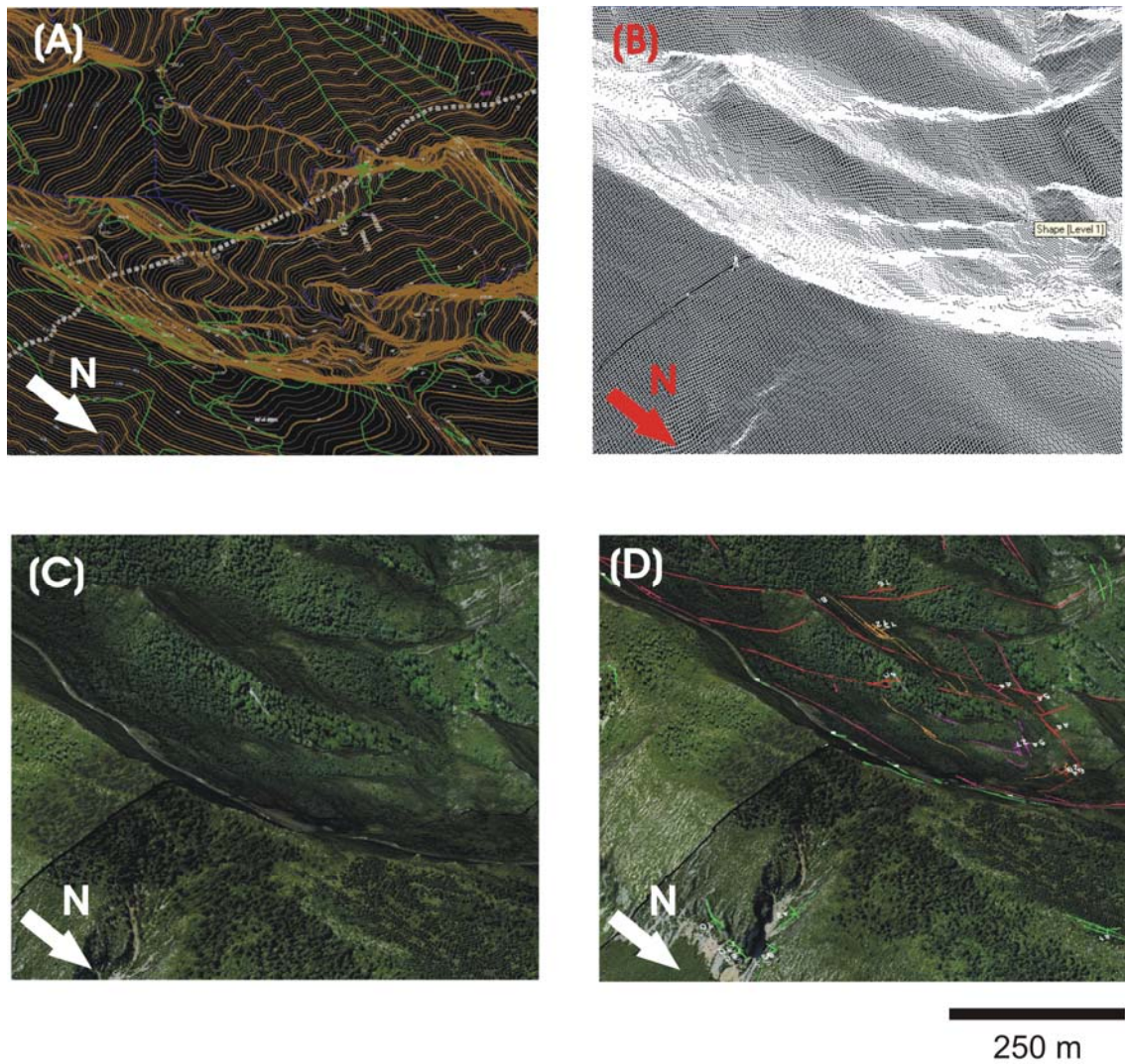


Fig. R5. Diferents etapes de la construcció del Model Digital del Terreny (DTM) i de la digitalització de les dades de camp. (A) Mapa topogràfic 1:5000 a partir del qual s'extreu un model d'elevació en XYZ. Després, es porta a terme una triangulació creant una malla feta de triangles. A partir d'aquesta es crea una malla regular de 5 x 5 m (B), sobre la qual s'entapissa la corresponent ortofotografia (C). Amb el MDT disponible ja es poden digitalitzar totes les dades, posicionant-les a les seves corresponents coordenades XYZ (D).

R.5.2 RESULTATS DE LA RECONSTRUCCIÓ

Mitjançant la metodologia exposada s'han reconstruït vuit horitzons estratigràfics i nou superfícies de falla. De la seqüència pre-plegament s'han reconstruït les superfícies corresponents al sostre de les següents unitats (Fig. R7): 1) Formació Guara (superfície de referència del plec); 2) les fàcies del Garumnià; 3) el Cretaci superior; i 4) els materials Triàsics. Vuit superfícies de falla, l'encavalcament intern N-S de l'anticlinal així com la geometria de

l'encavalcament frontal sudpirinenc han estat també reconstruïts. De la seqüència d'estrats de creixement s'ha reconstruït el sostre de quatre superfícies, corresponents a les quatre seqüències deposicionals principals de les Formacions Arguis i Belsué-Atarés (GS-I a GS-IV; Figs. R8 i R9).

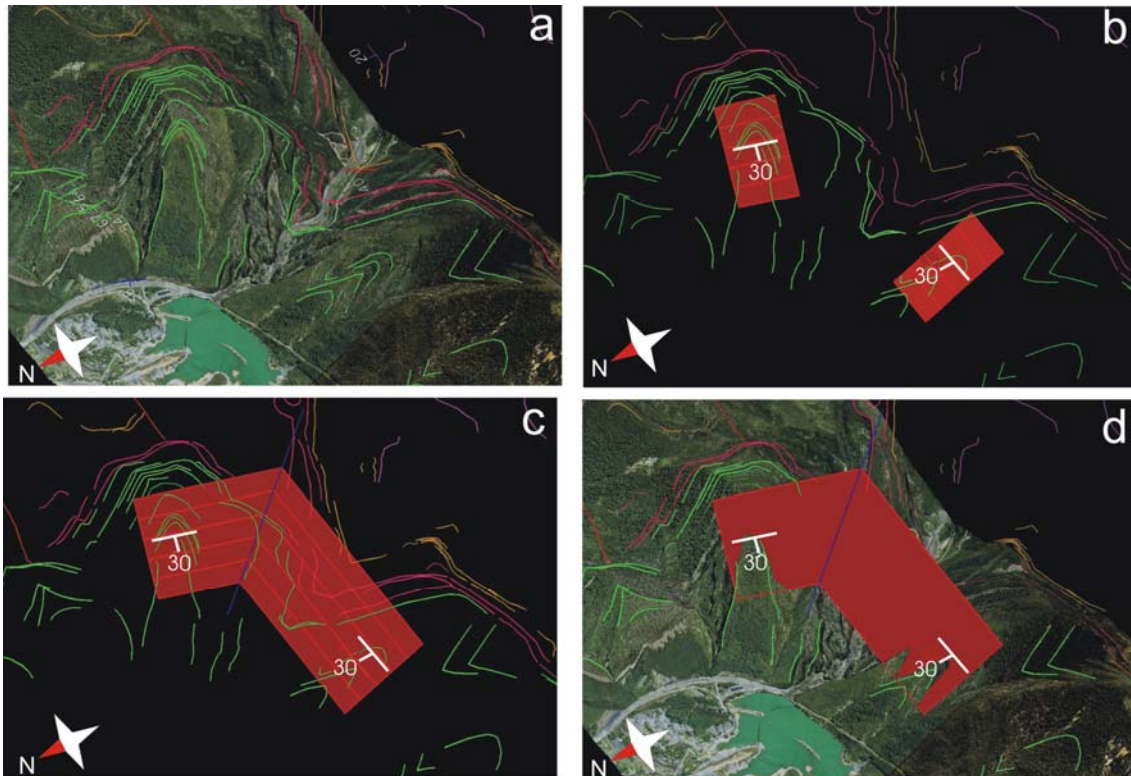


Fig. R6. Diferents passos resumint el procés seguit per generar els dominis de cabussament: a) posicionament de les mesures de cabussament; b) creació dels dominis de cabussament; c) definició de l'extensió, intersecció dels diferents dominis i creació del mapa de contorns estructurals; i d) generació de la superfície.

La geometria de l'encavalcament frontal sudpirinenc consisteix en una rampa que cabussa cap al nord, variant des de 15° a la part septentrional de l'anticlinal fins a 37° en la zona frontal emergent, i un replà subhoritzontal que s'estén cap al nord. El sostre de la Formació Guara no es troba massa afectat per la presència de les falles internes, i fossilitza l'encavalcament intern N-S de l'anticlinal. Les unitats inferiors, en canvi, mostren un patró estructural complex

degut a la interferència entre les falles (d'orientació compresa entre E-W i NNE-SSW) i l'encavalcament N-S (Figs. R7 i R10a).

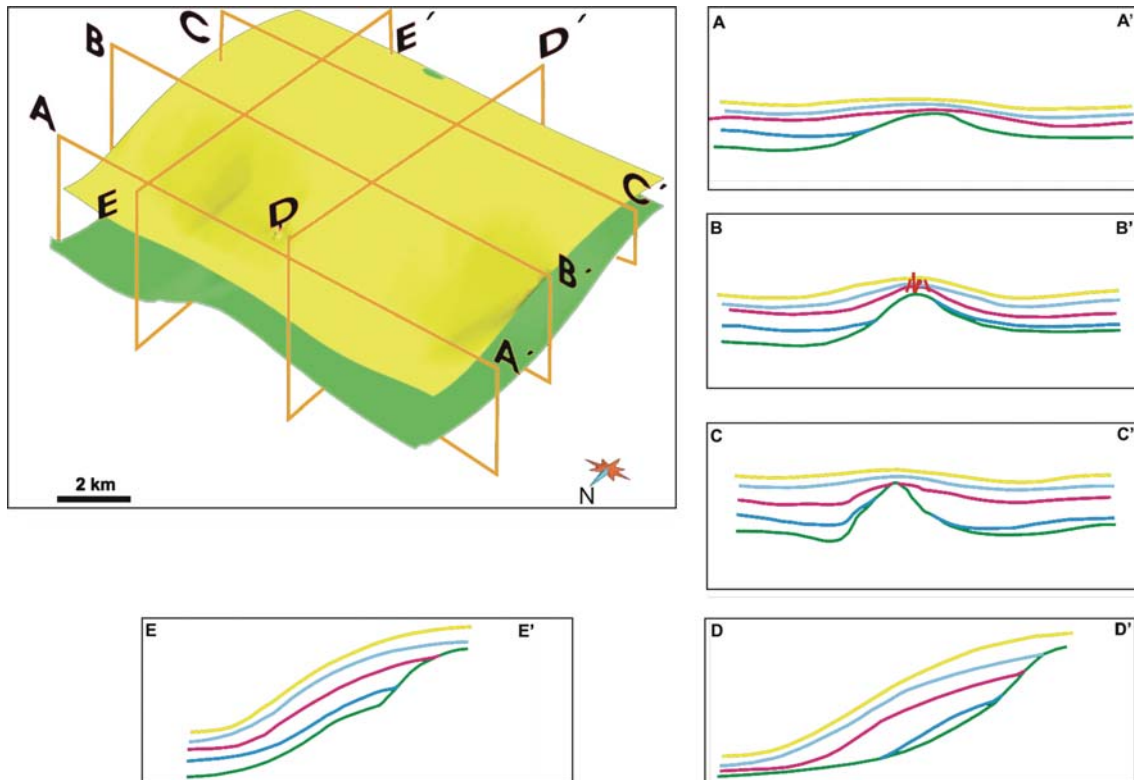
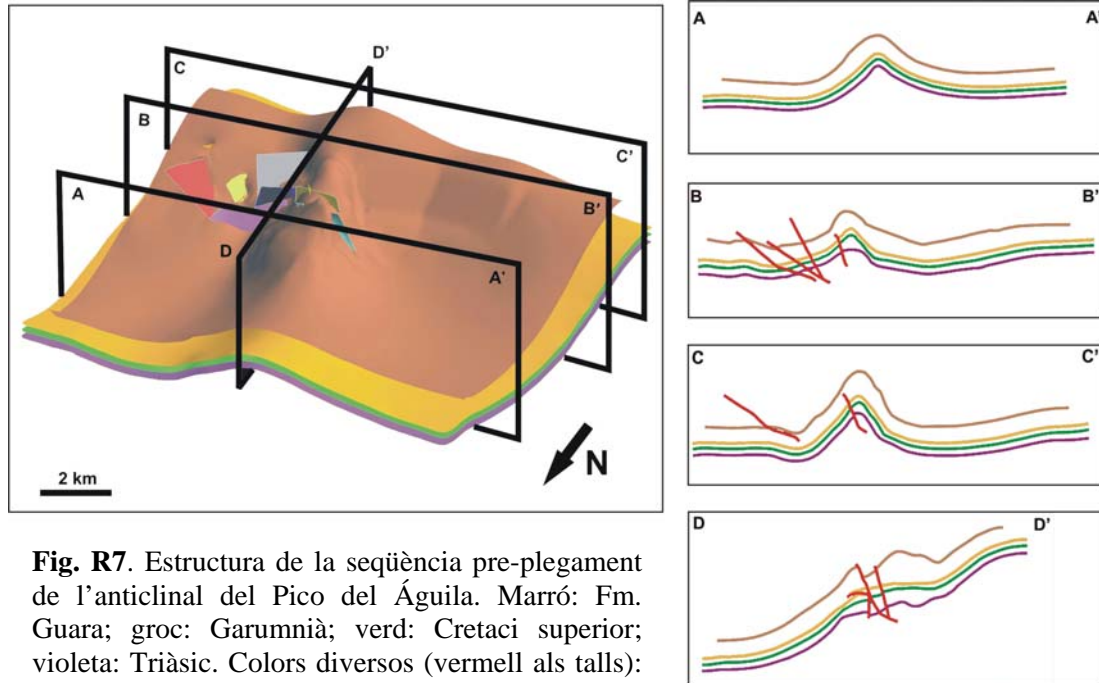


Fig. R8. (PÀGINA ANTERIOR) Estructura dels estrats de creixement de l'anticlinal del Pico del Àguila, mostrant la geometria de les seqüències deposicionals reconstruïdes sobre el sostre de la Formació Guara (en verd). Observi's com les GS s'aprimen cap a la cresta de l'anticlinal i com la GS-I no assoleix la xarnera.

La seqüència sin-plegament mostra una geometria més suavitzada, caracteritzada per un aprimament cap a la cresta de l'anticlinal i un decreixement cap a sostre de la intensitat de la deformació (Figs. R8, R9 i R10b). La seqüència GS-I no arriba a cobrir la cresta de l'anticlinal, i descriu geometries en *onlap* sobre ambdós flancs de l'anticlinal. Les seqüències superiors cobreixen progressivament el sostre de la Formació Guara (Figs. R8 i R9).

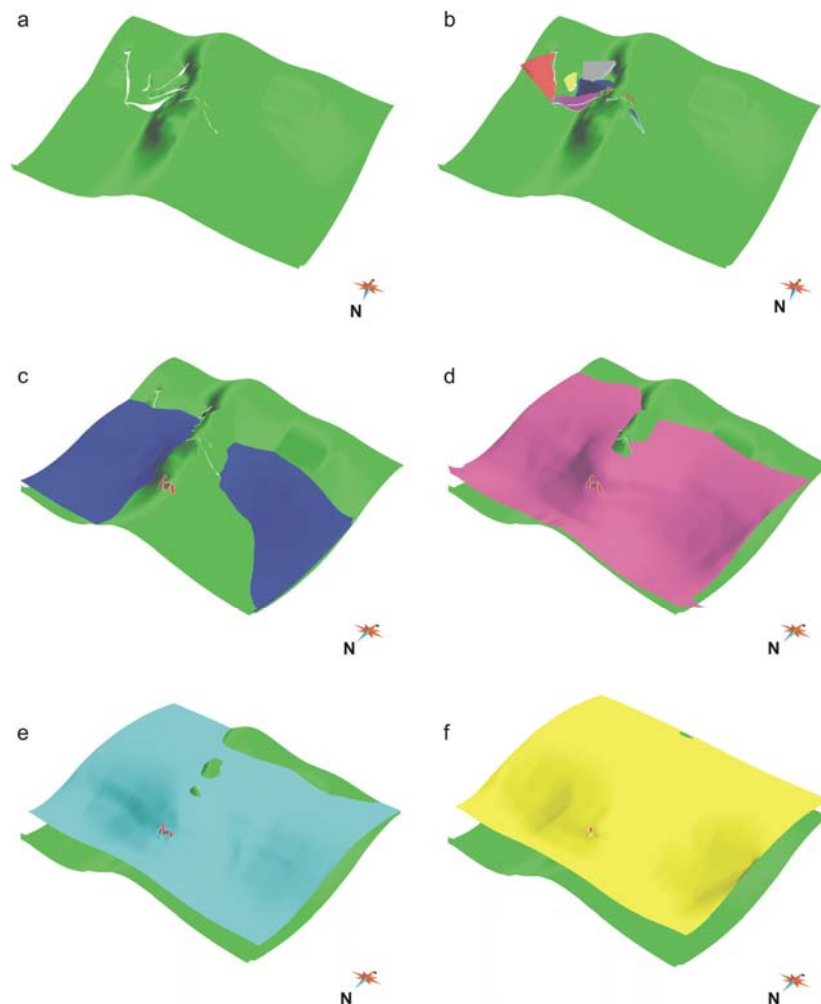


Fig. R9. Vistes 3D dels estrats de creixement: a) Sostre de la Fm Guara (en marró a la Fig. R7); b) Formació Guara amb les falles internes; c) GS-I; d) GS-II; e) GS-III; f) GS-IV.

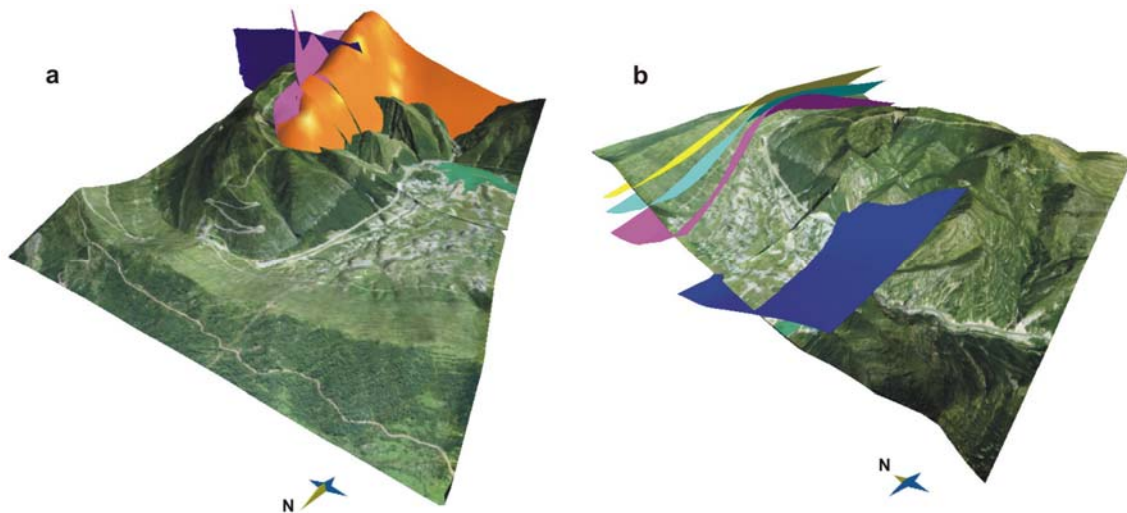


Fig. R10. Imatges obliques de l'anticlinal del Pico del Águila: a) mostra la interferència entre l'anticlinal (superfície del sostre del garumnià, en taronja), el conjunt de falles internes d'orientació NNE-SSW a E-W (blau fosc) i l'encavalcament intern N-S (rosa); b) mostra la geometria dels estrats de creixement intersectant la topografia i aprimant-se cap al tancament periclinal del plec definit pel sostre de la Formació Guara.

R.6 MODELITZACIÓ ANALÒGICA: GENERACIÓ D'ESTRUCTURES PERPENDICULARS A L'OROGEN

Els models analògics presentats en aquest treball investiguen la geometria inicial del nivell basal de desenganxament com a possible factor de control en la generació d'estructures obliqües i perpendiculars a l'orogen tals com les descrites a les Sierras Exteriores Aragonesas. El disseny de l'experiment es basa en observacions de camp que indiquen una pràctica absència de les fàcies Keuper al nucli dels anticlinals N-S (p.ex. anticlinals del Pico del Águila i Gabardiella; Fig. R1), i un gruix més notable d'aquests materials a les zones intermèdies, on les estructures generals pirinenques E-W es formen (p.ex. el front d'encavalcament sudpirinenc). La intenció de simular aquest nivell basal de desenganxament distribuït heterogèniament va ser la de testar si els canvis laterals de fricció podien ser capaços o no de causar la generació d'estructures arquejades, obliqües i perpendiculars independentment de la orientació de la direcció d'escurçament.

R.6.1 CONFIGURACIÓ INICIAL

La configuració inicial de l'experiment es compon d'una seqüència de capes de sorra interestratificades i de diferents colors que cobreixen un nivell basal irregular format per tres cossos de silicona separats per sorra sense cohesió (Fig. R11). La cobertora sedimentària de materials del Cretaci superior fins al Lutecià, doncs, es va simular mitjançant sorra quarzítica de densitat 1700 kg m^{-3} , valor de cohesió C d'uns 140 Pa i garbellada a una mida de gra promig de $35 \mu\text{m}$. El nivell de desenganxament irregular Triàsic es va simular mitjançant la silicona SGM36 (amb una densitat de 987 kg m^{-3} i viscositat efectiva η de $5 \times 10^4 \text{ Pa s}$ a temperatura ambient, manufacturada per Dow Corning Ltd.) intercalada lateralment amb sorra quarzítica seca i sense cohesió.

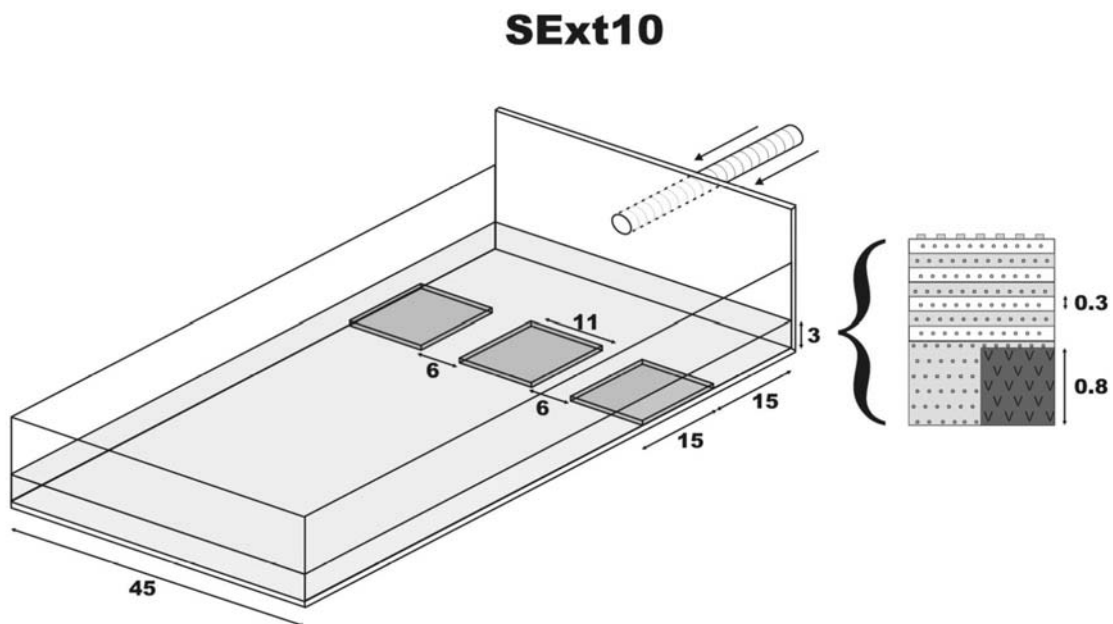


Fig. R11. Configuració inicial del model analògic Sext10 presentat en aquesta Tesi, mostrant la distribució dels desenganxaments dúctils (SGM-36) i fràgils (sorra) i l'orientació de l'escurçament. La seqüència estratigràfica del model es mostra a la dreta. Tots els valors són en cm.

L'aparell de deformació es trobava sobre una placa d'alumini a la qual se li van encolar grans de sorra. Els models tenien una amplada fixa de 45 cm, una longitud inicial de 60 cm i un gruix constant de nivell de desenganxament de 8

cm (Fig. R11). La intenció d'encolar sorra sobre la placa basal d'alumini va ser la de forçar un comportament altament friccional en el basament per tal d'accentuar el contrast entre el desenganxament dúctil (capes de silicona) i el desenganxament friccional (sorra). Es va aplicar compressió a una velocitat constant de 2 cm/h (5.56×10^{-6} m/s) des d'un únic costat utilitzant un pistó mobilitzat per un motor (Fig. R11). Els models es van comprimir fins a un 20% durant 6 hores.

R.6.2 RESULTATS DE LA MODELITZACIÓ ANALÒGICA

L'escurçament aplicat als models va causar la deformació tant en les capes de sorra com en les de silicona. El patró de deformació va ser diferent entre les zones desenganxades sobre un nivell friccional (sorra; àrees HF) i les zones desenganxades sobre un nivell dúctil (silicona; àrees LF). La deformació començà amb l'aparició de tres encavalcaments a grans trets rectilinis, donat que el front de deformació encara no havia assolit la posició de la silicona. Després d'un 9% d'escurçament (Fig. R12b) el front de deformació assoleix la posició de la silicona, creant així una diferència d'avenç entre les àrees desenganxades sobre la sorra i les desenganxades sobre la silicona. Les àrees HF mostren un aixecament addicional respecte les àrees LF, que ocasionalment s'expressa a través de petits encavalcaments oblics que s'uneixen a l'encavalcament frontal principal en la part posterior del model. Després d'un 16% d'escurçament (Fig. R12c) les estructures no poden acomodar més deformació i el front migra cap endavant. Com a conseqüència, es forma una segona generació d'estructures paral·leles a la direcció d'escurçament. Malgrat això, en aquesta segona generació la posició del front de deformació coincideix amb la línia d'acabament de les capes de silicona. Després d'un 20% d'escurçament (Fig. R12d) les àrees HF no avancen tanta distància com les àrees LF, creant un patró estructural constituït per encavalcaments de morfologia ondulada que transporten més lluny les àrees desenganxades sobre silicona que no pas les àrees desenganxades sobre sorra.

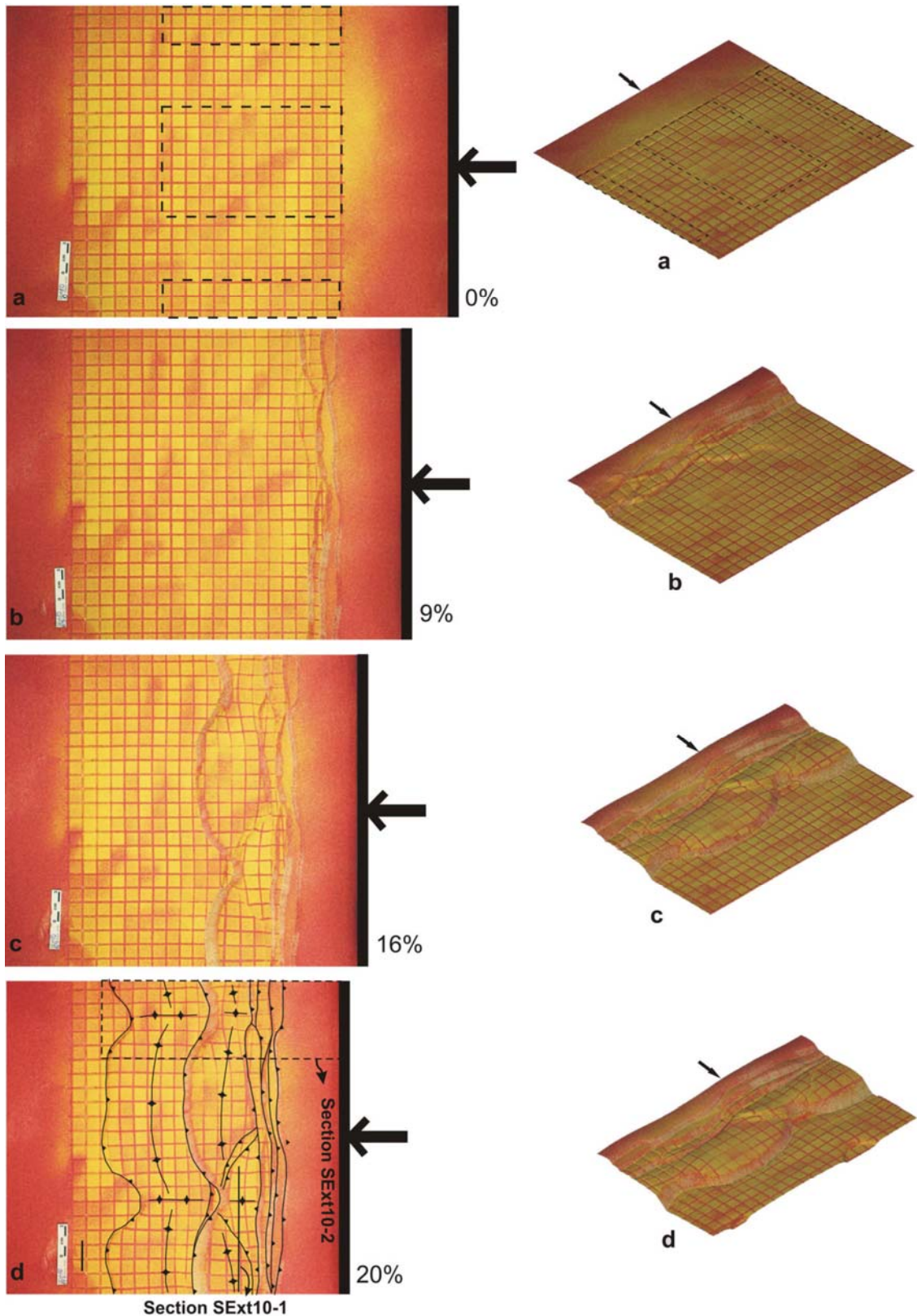


Fig. R12. Vistes en planta i en 3D del model analògic en diferents etapes d'escurçament: a) estadi no deformat; b) 9% d'escurçament; c) 16% d'escurçament; d) 20% d'escurçament. Les fletxes indiquen l'orientació i sentit de l'escurçament.

La deformació de les capes dúctils per flux i engruiximent dúctil i plegament es transfereix lateralment a les àrees HF, de forma que es generen rampes laterals dels encavalcaments que ascendeixen en la sèrie des de la terminació lateral de les capes de sílica. Aquestes rampes laterals s'uneixen en el nucli de les àrees HF, produint aixecament i suau deformació en les unitats superiors mentre que les unitats inferiors pateixen gran deformació interna per mitjans de falles (Fig. R13 a i b). Es produeix doncs una migració lateral de les capes dúctils cap a les àrees HF, així com un engruiximent al llarg del límit entre les àrees HF i LF, on les rampes laterals descrites es desenganxen (Fig. R13 a i b). Les seccions horitzontals mostren la geometria interna de les capes en profunditat, podent-se observar com les capes mostren encavalcaments dirigits cap a l'avantpaís en els que les unitats inferiors es troben encavalcades mentre que les superiors es troben suaument plegades. L'únic tancament periclinal observable es troba al costat més proper a l'orogen de les estructures transversals (Fig. R13), indicant així que aquestes estructures tenen una certa immersió cap a l'orogen degut al basculament creat per l'emplaçament de la làmina encavalcant.

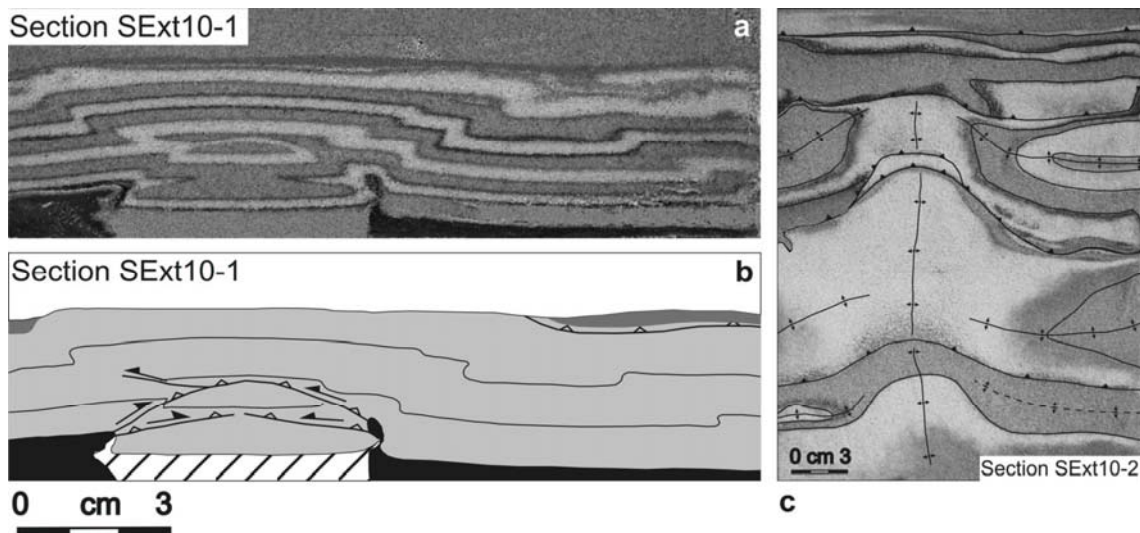


Fig. R13. Imatges i interpretacions de seccions perpendiculars a l'escurçament i seccions horitzontals preses del model SExt10 (veure Fig. R12 per localització de les seccions). La secció SExt10-1 mostra l'aixecament addicional de les zones HF respecte les LF, i com les capes dúctils es fan més gruixudes cap al centre de les zones HF. La secció SExt10-2 mostra la interferència estructural entre les estructures paral·leles a l'orogen i les perpendiculars, proporcionant una informació valiosa sobre com les unitats canvien de morfologia quan canvia el comportament mecànic del desenganxament basal.

Les àrees desenganxades sobre sorra, per tant, acomoden la deformació per mitjans d'un aixecament addicional respecte les àrees desenganxades sobre sílica, desenvolupant-se suaus anticlinals perpendiculars a l'orogen en el bloc superior dels encavalcaments. La localització de les crestes d'aquests anticlinals coincideix pràcticament amb el centre de les àrees HF. Aquest fet indica que el contrast de fricció entre la sorra i la sílica al llarg de la direcció d'escurçament ha permès la nucleació dels encavalcaments sobre la línia d'acabament lateral de les capes de sílica.

R.7 MODELITZACIÓ NUMÈRICA: EFECTE DE L'ESTRATIGRAFIA MECÀNICA I SEDIMENTACIÓ SIN-CINEMÀTICA

Aquest subcapítol presenta els resultats obtinguts a partir d'un model numèric, el qual s'ha utilitzat per millorar el coneixement sobre l'efecte de una estratigrafia mecànica complexa (no trivial) i de la sedimentació sin-cinemàtica en el creixement de l'anticlinal del Pico del Águila. Per tal de portar-ho a terme s'ha emprat una tècnica de modelització 2D coneguda com Modelització d'Elements Discrets (*Discrete Element Modelling, DEM*).

Aquest mètode tracta una massa de roca com un conjunt d'elements circulars connectats per parelles mitjançant enllaços que es trenquen per sobre de determinats llimars de deformació (Hardy & Finch, 2005, 2007). Assignant doncs diferents valors de llindar de trencament a cada parella d'elements és possible modelitzar diferents propietats mecàniques (p.ex. a una seqüència estratigràfica) en el conjunt d'elements que simulen la massa de roca. Això ens permet testar l'efecte d'una determinada estratigrafia mecànica sobre la geometria, la cinemàtica i els mecanismes que es produeixen al plec. D'aquesta manera, aquest mètode proporciona més informació que les tècniques de modelització cinemàtica prèvies. A més, permet una fàcil supervisió del desplaçament/localització dels elements durant la modelització. El trajecte de desplaçament, l'evolució cinemàtica i la distribució de la deformació dins del cos de roca pot ser fàcilment seguida a qualsevol estadi de la modelització. Donada

la intercalació de materials competents i incompetents que caracteritza l'estratigrafia de la zona d'estudi (Fig. R2) considerem aquest un mètode adient per modelitzar l'evolució de l'anticlinal del Pico del Águila.

Com s'ha esmentat prèviament, el Pico del Águila ofereix una bona secció al llarg de l'eix del plec de tota la seqüència estratigràfica, fins als materials Triàsics del nucli, així com una estratigrafia mecànica ben descrita i una excel·lent preservació i aflorament dels estrats de creixement que enregistraren el creixement del plec. Això proporciona una excel·lent base per poder comparar com la estratigrafia mecànica es comporta tant en el model com en la natura, i com la sedimentació sin-cinemàtica va influenciar l'evolució del plec.

R.7.1 CONFIGURACIÓ INICIAL I PARÀMETRES EXPERIMENTALS

El comportament de la massa de roca modelitzada és a grans trets elasto-plàstic i sense fricció (Place and Mora, 2001; Finch et al., 2003, 2004; Hardy and Finch, 2005, 2007), una aproximació que ja s'ha emprat prèviament en altres estudis per modelitzar deformació fràgil en roques sedimentàries a l'escorça superior. La deformació de la seqüència sedimentària modelitzada es produeix en resposta a l'escurçament per subducció de la base del model a través d'una ranura localitzada al centre de la caixa, en la qual la meitat dreta del model es mou cap a l'esquerra a una velocitat continua de 0.001 m per unitat de temps (Fig. R14). S'ha emprat una densitat homogènia de 2500 kg m⁻³ per tota la massa de roca, un valor comú en la modelització de roques sedimentàries en l'escorça superior. La constant elàstica K és de 5.5 x 10⁹ N m⁻². L'experiment va córrer durant 2 x 10⁶ unitats de temps amb entrega de resultats cada 10⁵ unitats (és a dir, cada 100 m d'escurçament). Això va proporcionar un control precís sobre l'evolució estructural del plec i sobre la variació de la deformació, així com una geometria dels estrats de creixement ben delimitada. El desplaçament total de l'experiment va ser de 2 km.

En el marc de treball de la modelització una *Lattice Unit* (LU) equival a 250 metres. El conjunt inicial de partícules conté 10245 elements, agrupats en

quatre subconjunts de radis diferents: 0.125, 0.1, 0.075 i 0.05 LU (és a dir, 31.25, 25, 18.75, 12.5 m, respectivament). Aquests elements estan distribuïts aleatòriament en una caixa rectangular tancada. Considerem aquestes dimensions adients, donat que proporcionen suficient resolució per modelitzar una estructura d'escala quilomètrica com el Pico del Àguila, evitant la generació de plans preferents de debilitat i permetent per tant una localització de la deformació no predefinida. Després de la generació inicial del conjunt d'elements, aquests es deixen reposar fins que arriben a un equilibri estable i se'ls deixa compactar sota l'efecte de la gravetat durant 2×10^6 unitats de temps fins a obtenir una configuració inicial d'elements estable, ben empaquetada, que minimitza l'espai entre partícules. La configuració inicial resultant d'aquest procés de sedimentació i compactació mesura 12.5 km de llarg i aproximadament 1.25 km de gruix estratigràfic, simulant una massa de roca continua que pot deformar-se per trencament progressiu dels enllaços entre partícules (fracturació/falles) i moviment massiu de parelles d'elements sense trencament d'enllaços (plegament).

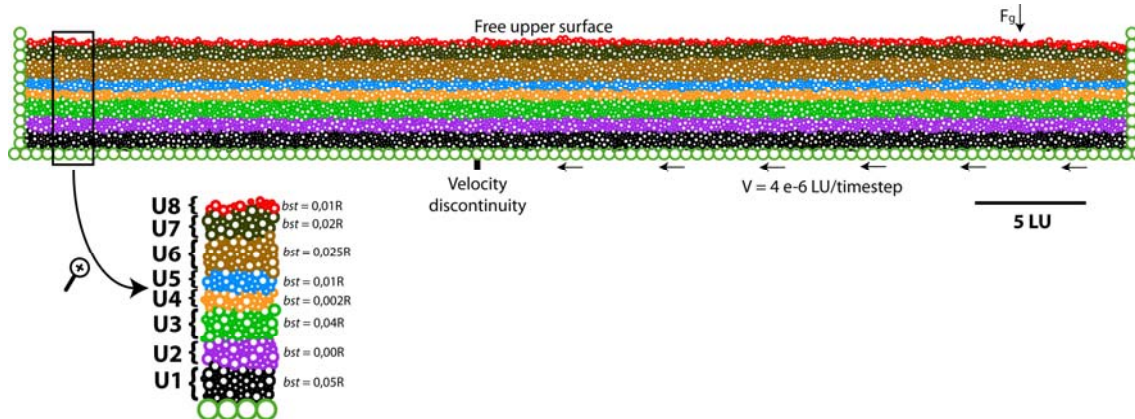


Fig. R14. Configuració inicial i condicions de contorn aplicades al model numèric d'elements discrets. EL conjunt inicial contenia 10245 elements de radi 31.25, 25, 18.75, i 12.5 m, posicionats aleatòriament dins de la caixa, la qual mesura 12.5 x 1.25 km. La massa de roca està composta de 32 capes inicialment horitzontals agrupades en vuit unitats de propietats mecàniques diferents. El desplaçament va ser de 0.001 m/unitat de temps. F_g correspon a la força de la gravetat.

La seqüència sedimentària sin-cinemàtica es va modelitzar afegint sediments incrementalment fins a un total de 11708 elements. La configuració inicial està formada per 32 capes horitzontals agrupades en unitats amb diferents propietats mecàniques per tal de crear una complexa estratigrafia mecànica (Fig. R14).

R.7.2 RESULTATS DE LA MODELITZACIÓ NUMÈRICA

L'evolució de la geometria i la deformació de cisalla del model es mostren a la Fig. R15.

Després d'un 4% d'escurçament (500 m; Fig. R15b) una petita estructura incipient, de poca amplitud, ha començat a formar-se sobre la discontinuïtat de velocitat (ranura al centre del model). Les unitats incompetents U2 i U4 mostren alta deformació de cisalla (abreujada com a "deformació" *sensu lato* a partir d'ara) tant en l'estructura com a certa distància d'ella al llarg del model. La unitat més competent, U1, es troba ja molt deformada en el nucli de l'anticlinal. Les altres unitats pre-cinemàtiques mostren baixa deformació, lleugerament accentuada a la zona de l'anticlinal (Fig. R15b). Els estrats de creixement mostren gran deformació, tot i que variable, al llarg de l'estructura. Tanmateix, cal distingir dos tipus de deformació dins dels estrats de creixement: en primer lloc la deformació de cisalla deguda a la deposició i continua compactació de les unitats més recents (deformació restringida essencialment a les dues capes més superficials del conjunt; Fig. R15); en segon lloc la deformació mostrada per la pila sedimentària sin-cinemàtica deguda a l'escurçament i plegament de l'estructura. Un efecte de vora s'observa al límit dret del model degut al desplaçament de la paret de la caixa cap a l'esquerra. Després d'un escurçament del 8% (1000 m; Fig. R15c) l'estructura central ha crescut significativament, els flancs estan més inclinats i mostra una lleugera vergència cap a la dreta. S'observa disharmonia en el plegament: sota U4 s'han generat plecs menors, particularment entre U2 i U4 cap a la dreta del model. U1 mostra una complexa deformació al nucli de l'anticlinal. Per sobre de U4 la geometria de l'anticlinal es més suau, dibuixant un plec continu. Els estrats de

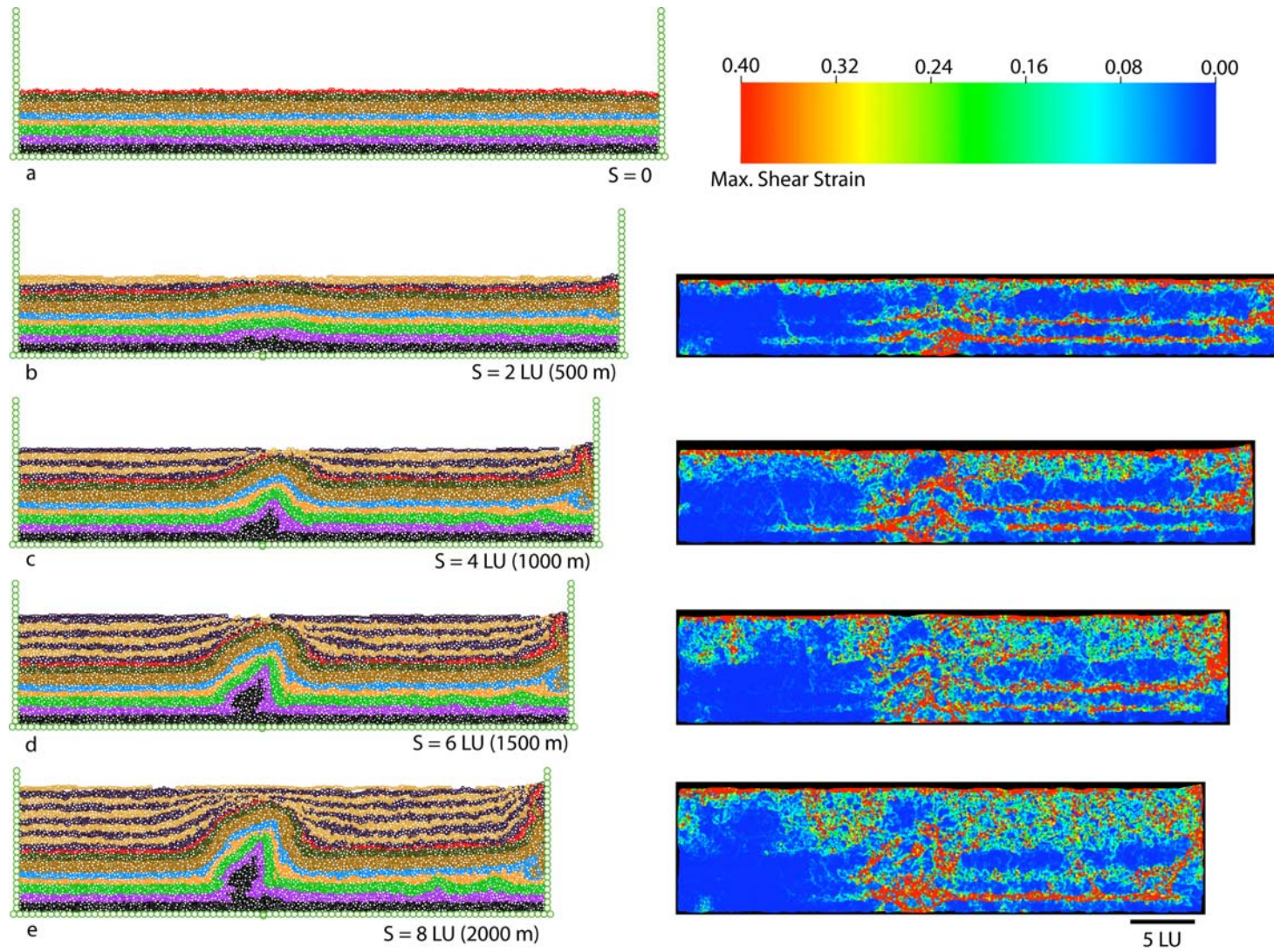


Fig. R15. (PÀGINA ANTERIOR) Evolució del model numèric després de: a) 0m; b) 500 m; c) 1000 m; d) 1500 m; e) 2000 m d'escurçament. La columna de l'esquerra mostra l'evolució geomètrica de l'anticlinal, mentre que la columna dreta mostra la distribució de la deformació en cadascuna d'aquestes etapes. L'escala a dalt a la dreta mostra el rang de deformació considerat.

creixement mostren marcades diferències de gruix estratigràfic produint prismes sedimentaris que s'aprimen cap a la xarnera de l'anticlinal. En els estrats de creixement s'observa una deformació moderada a alta, amb un contrast distintiu de deformació localitzat a la base dels sediments sincinemàtics. Després d'un escurçament del 12% (1500 m; Fig. R15d) s'observa un clar engruiximent de les capes més incompetents a les zones de xarnera d'ambdós sinclinals associats a l'estructura central, així com una deformació molt complexa al nucli de l'anticlinal. En particular, U1 esdevé dramàticament deformada, mostrant una geometria de coll d'ampolla. Plecs menors creixen a U2 entre l'anticlinal i el límit dret del model. S'observa plegament disharmònic a la xarnera de l'anticlinal, amb grans contrastos en l'estil de plegament per sobre i per sota de U4. La major part de la deformació segueix concentrada en les unitats menys competents. Els estrats de creixement roten i s'aprimen cap al creixent anticlinal, exhibint una gran deformació interna. Després d'un escurçament del 16% (2000 m; Fig. R15e) el creixement vertical de l'anticlinal sembla aturar-se (els estrats de creixement cobreixen l'estructura) amb el plec estrenyent-se mitjançant rotació dels flancs. Malgrat això, el model mostra un desplaçament en la distribució de la deformació cap a la dreta, manifestat per la propagació del plegament des del límit dret i donant lloc a petits plecs de desenganxament que es generen sobre U2. En l'estructura central la deformació segueix concentrada al nucli, així com als flancs especialment en les unitats U4 i U5. Al nucli, U1 mostra una morfologia encara més accentuada de coll d'ampolla. En aquest estadi els estrats de creixement mostren un gruix màxim als sinclinals de 1.2 km, valor similar al descrit al camp a l'anticlinal del Pico del Àguila.

R.8 RESTITUCIÓ GEOMECÀNICA 3D DE L'ANTICLINAL DEL PICO DEL ÀGUILA

La restitució geomecànica de l'anticlinal del Pico del Àguila s'ha realitzat utilitzant un algoritme de Modelització d'Elements Finites (*Finite Element Modelling, FEM*), el qual considera propietats mecàniques de les roques per restituir l'estructura de l'anticlinal (el que s'ha anomenat recentment *restitució geomecànica*), en comptes de considerar qualsevol criteri de caire cinemàtic. En la majoria dels casos la cinemàtica d'una estructura és desconeguda o, si més no, no s'ha quantificat de forma precisa. D'aquesta manera la restitució geomecànica proporciona un resultat mecànicament estable basat en la geometria de l'estadi deformat i en les propietats mecàniques de les roques, tals com densitat, mòdul de Young i coeficient de Poisson ([Maerten and Maerten, 2006](#); [Guzofski et al., 2009](#)).

R.8.1 METODOLOGIA I CONFIGURACIÓ INICIAL

La restitució seqüencial de l'anticlinal del Pico del Àguila es va portar a terme amb el programa Dynel3D (igeoss. [Maerten & Maerten, 2006](#)). El codi implementat a Dynel3D està basat en un algoritme de tipus FEM, una tècnica de medis continus que permet l'estudi de la deformació natural basat en les propietats mecàniques de les roques. Malgrat que és un mètode estrictament elàstic, és adient per modelitzar el comportament d'estructures geològiques complexes tals com plects i falles ([Maerten & Maerten, 2006](#)). Les unitats estratigràfiques es discretitzen en un conjunt d'elements (tetraedres) als quals se'ls hi assignen les propietats mecàniques. Les falles es representen per superfícies de contacte entre grups de tetraedres. Aquests elements tetraèdrics es deformen elàsticament en resposta a restriccions tals com forces aplicades o/i internes, desplaçaments i regions de contacte entre superfícies (falles). Les equacions de l'algoritme es resolen de forma iterativa i explícita, de forma que les forces es poden transmetre de node a node a través de tot el sistema fins que s'assoleix l'equilibri. La formulació de l'algoritme és doncs adient per modelitzar escenaris geològics complexos que comprenen diverses etapes de deformació,

com és el cas de la restitució estructural. A més, la solució explícita que proporciona l'algoritme és eficient i estable (Maerten & Maerten, 2006).

El model 3D del Pico del Àguila es va utilitzar com a estadi deformat per la restitució. La reconstrucció dels estrats de creixement va esdevenir clau per poder establir una cronologia de la deformació a partir de la restitució de les diverses seqüències deposicionals (GS-I a GS-IV). La mida promig dels tetraedres (la resolució) va ser de 310 m per costat, un balanç raonable per representar una estructura d'escala quilomètrica sense excedir el límit de memòria permès per un ordinador personal estàndard. Malgrat això, aquest valor de resolució implica que certs cossos de dimensions inferiors no puguin ser representats o hagin de ser simplificats en cossos de dimensions superiors. És el cas de les unitats del Cretaci superior i el Garumnià, que tenen un gruix estratigràfic molt per sota de la resolució dels tetraedres, i que van haver de ser fusionades en una única unitat mecànica anomenada *Garumnià-Cretaci*, caracteritzada per unes propietats mecàniques promig de les dues unitats inicials. De manera similar, les vuit falles internes de l'anticlinal es caracteritzen per un salt de falla de desenes de metres, valor molt inferior a la resolució dels tetraedres. Aquestes falles, per tant, no van considerades en la restitució de l'estructura.

Com ja s'ha esmentat, l'algoritme que utilitza Dynel3D necessita diverses propietats mecàniques de les roques, que han de ser indicades prèviament a la restitució. Donat que aquestes propietats (densitat, mòdul de Young i coeficient de Poisson) varien amb la litologia al llarg de la seqüència estratigràfica, s'han establert diferents valors en funció de la litologia predominant a cadascuna de les unitats, els quals es resumeixen en la Taula 1.

R.8.2 RESULTATS DE LA RESTITUCIÓ GEOMECÀNICA

S'han considerat cinc estadis de restitució, d'acord amb la reconstrucció dels sostres de les quatre seqüències deposicionals GS-I, GS-II, GS-III i GS-IV, i del sostre de la Formació Guara (Fig. R16). A més de la geometria, es va obtenir també la distribució de la deformació de cisalla (abreviada "deformació" sensu

lato a partir d'ara) per cadascun dels estadis de la restitució, per tal d'entendre la evolució de la deformació a l'estructura (Fig. R17).

La restitució del sostre de la seqüència GS-IV (36.6 Ma) elimina la major part del basculament associat a l'emplaçament de l'encavalcament frontal sudpirinenc (Fig. R16 a i b). A més, s'observa una rotació d'eix vertical d'uns 15°. La deformació es distribueix de forma heterogènia arreu del model (Fig. R17b). La GS-IV mostra una deformació moderadament alta distribuïda al llarg dels sinclinals associats, i que s'incrementa cap a l'anticlinal (els valors més alts coincideixen amb les àrees en les que la GS-IV és més prima; Fig. R17b). La resta de les GS mostren gran deformació a la xarnera dels sinclinals. A la seqüència pre-plegament les unitats del Garumnià-Cretaci i del Triàsic mostren una gran deformació a les zones de xarnera de l'anticlinal i dels sinclinals associats. La Formació Guara mostra una deformació baixa a moderada al llarg d'ambdós flancs, i gran deformació a la xarnera dels sinclinals (Fig. R17b).

La GS-III (37.17 Ma) és la primera seqüència restituïda que no cobreix tot l'anticlinal. La seva restitució dona com a resultat un modest decreixement de la immersió de l'anticlinal d'uns 4° (Fig. R16c) i una rotació en el sentit de les busques d'uns 2°. S'observa deformació baixa a moderada a la xarnera de l'anticlinal a la GS-III, i baixa deformació en la resta de les GS. La deformació més important es localitza a la Formació Guara, concretament al sinclinal oriental i al llarg del flanc occidental (Fig. R17c). La unitat Garumnià-Cretaci mostra una deformació moderada a alta i un marcat lliscament de capa sobre capa respecte les unitats subjacent i suprajacent. El Triàsic mostra deformació moderada a alta, particularment concentrada a la meitat de la seqüència en les zones de xarnera de l'anticlinal i els sinclinals.

Després de restituir la GS-II (37.74 Ma) la immersió del plec és pràcticament negligible (Fig. R16d) i l'estructura ha rotat 10° addicionals. La deformació (Fig. R17d) és superior respecte l'estadi anterior, particularment a la zona del tancament periclinal de l'anticlinal. La Formació Guara va acomodar una deformació moderada al flanc oest i a la cresta de l'anticlinal, i alta deformació a la xarnera del sinclinal oriental (Fig. R17d). La unitat mecànica Garumnià-Cretaci mostra alta deformació en tota l'estructura a excepció de la

cresta de l'anticlinal. El Triàsic mostra una deformació poc heterogènia i moderada a alta.

La restitució de la GS-I (40.04 Ma) deixa veure ja la geometria de la Formació Guara a la cresta de l'anticlinal (Fig. R16e). S'observa una gran deformació en les unitats pre-plegament, mostrant un anticlinal ben desenvolupat, encara amb molta deformació acumulada. No s'observa una rotació d'eix vertical significativa respecte l'estadi anterior. La deformació a la GS-I es distribueix de forma heterogènia, mostrant una deformació baixa a moderada a la zona de xarnera dels sinclinals i al llarg dels flancs que dibuixen una geometria en *onlap* sobre la Formació Guara (Fig. R17e). La Formació Guara mostra baixa deformació en la cresta de l'anticlinal i una deformació moderada en el tancament periclinal i al llarg dels flancs. La unitat Garumnià-Cretaci mostra una deformació particularment alta a la xarnera de l'anticlinal i al llarg dels flancs. El Triàsic mostra una deformació moderada a alta als sinclinals i al llarg del desenganxament, i una baixa deformació a la cresta de l'anticlinal (Fig. R17e).

Finalment, la restitució de la Formació Guara (41.52 Ma) implica el desplegament de l'estructura així com una rotació addicional d'uns 6° (Fig. R16f). La rotació d'eix vertical varia entre les unitats de la sèrie pre-plegament, mostrant una rotació lleugerament superior de cada unitat respecte a la unitat immediatament subjacent (la rotació és lleugerament superior a mida que es puja a la sèrie; Fig. R16f). La deformació varia de molt baixa a molt alta, amb valors baixos i moderats arreu del model, i pics de deformació molt alta concentrats a la xarnera dels sinclinals i localment a la cresta de l'anticlinal (Fig. R17f). La unitat Garumnià-Cretaci i el Triàsic mostren valors de deformació més alts a la xarnera dels sinclinals (Fig. R17f). El sostre i la base de les unitats mostren valors de deformació lleugerament més baixos al llarg dels contactes amb les altres unitats, i un significatiu lliscament de capa sobre capa entre elles.

Taula 1. Propietats mecàniques emprades per restituir l'anticlinal del Pico del Àguila.

Unitat	Litologia Predominant	Mòdul de Young (Pa)	Coefficient de Poisson	Densitat (Kg/m3)
GS-IV*	Gresos	2.2 e+10	0.24	2480
GS-III*	Gresos margosos	2.2 e+10	0.24	2480
GS-II*	Margues	2.8 e+10	0.14	2530
GS-I*	Margues	2.8 e+10	0.14	2530
Guara	Calcàries	4.8 e+10	0.25	2500
Garumnià-Cretaci	Lutites- Calcàries	2.8 e+10	0.14	2530
Triàsic	Calcàries dolomítiques	4.8 e+10	0.25	2500

Aquests són valors promig per cada tipus de roca, i parcialment basats en indicacions de camp.

* GS: Estrats de Creixement de les Formacions Arguis i Belsué-Atarés.

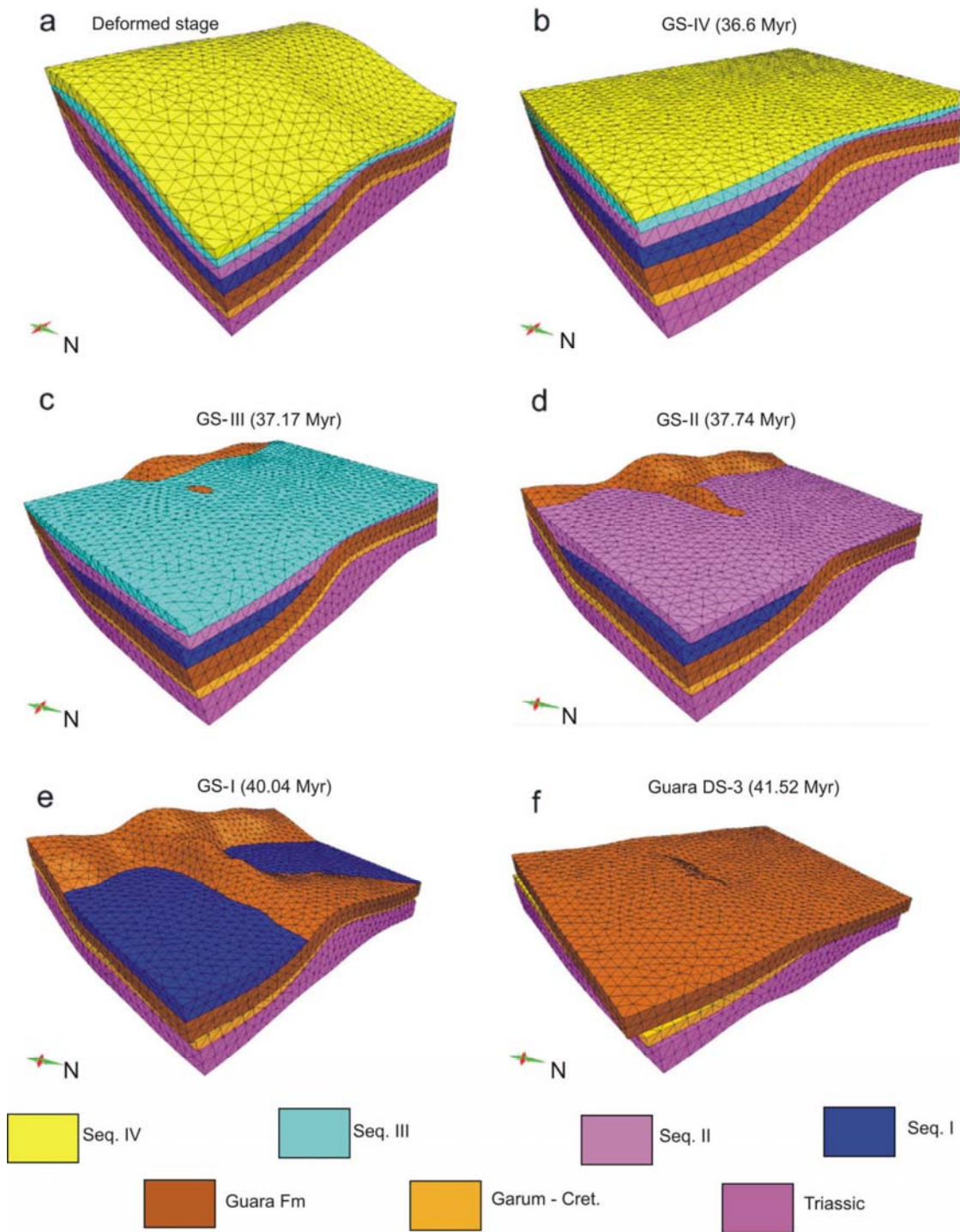


Fig. R16. Diferents estadis de la restitució geomecànica seqüencial de l'anticlinal del Pico del Águila: a) estadi deformat; b) restitució de la GS-IV (36.6 Ma); c) restitució de la GS-III (37.17 Ma); d) restitució de la GS-II (37.74 Ma); e) restitució de la GS-I (40.04 Ma); i f) restitució de la Formació Guara (41.52 Ma).

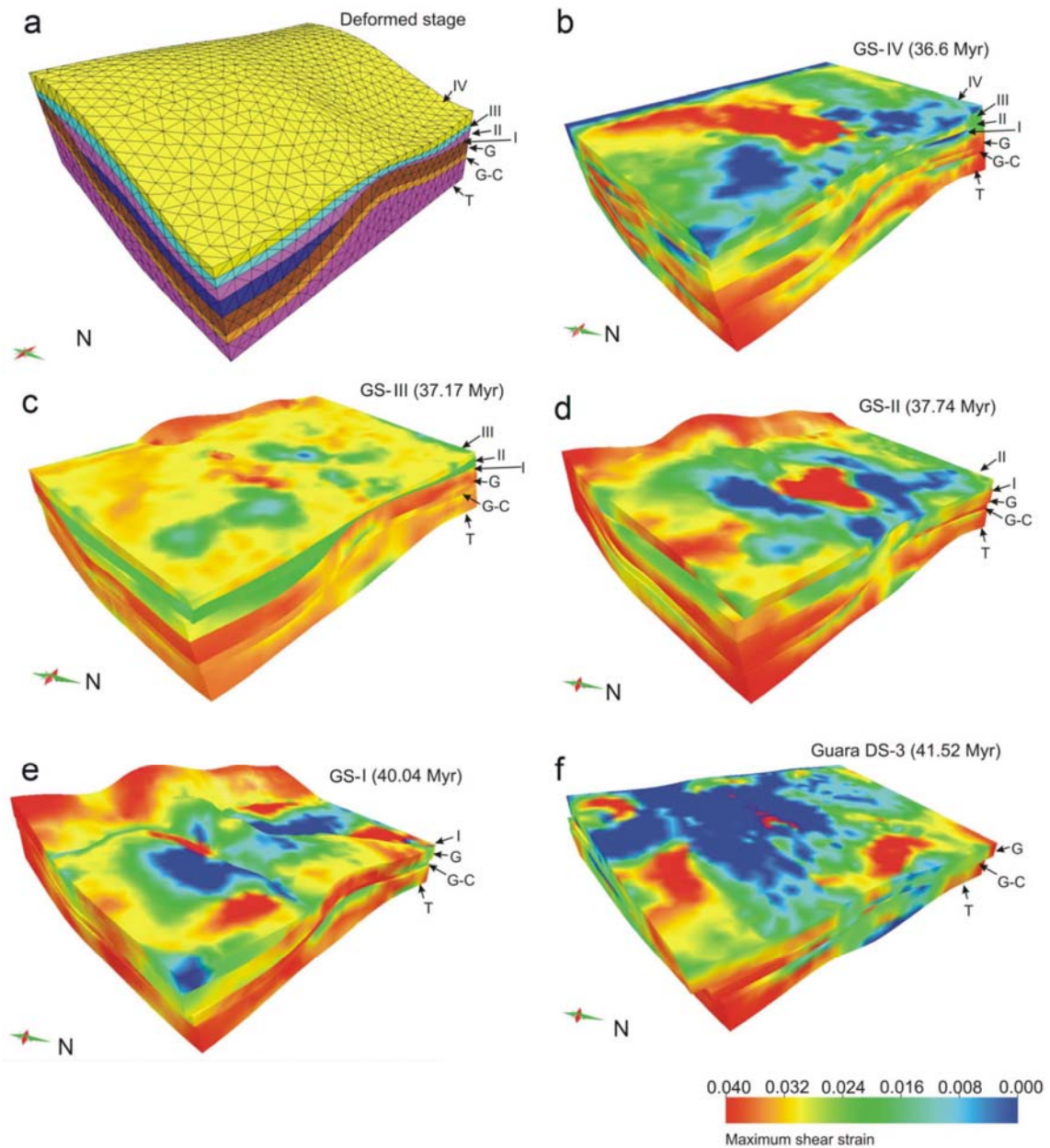


Fig. R17. Distribució de la deformació de cisalla entre els estadis de restitució mostrats a la Fig. R16: a) geometria de l'estadi deformat (com a referència); b) restitució de la GS-IV (36.6 Ma); c) restitució de la GS-III (37.17 Ma); d) restitució de la GS-II (37.74 Ma); e) restitució de la GS-I (40.04 Ma); i f) restitució de la Formació Guara (41.52 Ma). T: Triàsic; G-C: Garumnià-Cretaci; G: Guara; I: GS-I; II: GS-II; III: GS-III; IV: GS-IV.

R.9 RESUM DELS RESULTATS OBTINGUTS I DISCUSSIÓ

A continuació es presenta un resum dels resultats obtinguts mitjançant les diferents tècniques de modelització així com una discussió sobre els avantatges, inconvenients i limitacions de cadascuna d'elles, i la seva aportació al coneixement de l'evolució estructural de l'anticlinal del Pico del Águila.

R.9.1 BENEFICIS I DESAVANTATGES DE LES TÈCNiques EMPRADES

Cadascun dels models presentats proporciona nous coneixements sobre l'evolució estructural de l'anticlinal del Pico del Águila, millorant així el coneixement sobre la geologia de les Sierras Exteriores Aragonesas. Cadascun dels models va ser específicament dissenyat per testar certs paràmetres observats a la natura, incorporant les diferents contribucions al model d'evolució estructural. Tanmateix, cal tenir presents les limitacions de cadascuna de les tècniques de modelització per tal d'escollir el mètode més adient per un propòsit concret. D'aquesta manera es pot avaluar el resultat de cada model, extreure'n l'aportació neta i evitar així errors en la interpretació dels resultats.

En aquest sentit, la modelització analògica va ser una tècnica adient per modelitzar les heterogeneïtats del nivell de desenganxament basal a escala regional: va permetre una fàcil visualització en 3D de la resposta del model a la deformació en termes de avenç i aixecament diferencial de la cobertora sedimentària, estil estructural i relleu entre els diferents dominis estructurals. Els models analògics han representat encertadament els importants canvis d'estil estructural observats a escala regional. Els contrastos mecànics entre la sorra seca i la silicona van modelitzar encertadament l'efecte dels canvis laterals entre les fàcies Keuper i Muschelkalk al nivell de desenganxament Triàsic. Van reproduir eficientment un major aixecament d'orientació N-S (paral·lel doncs a la direcció d'escurçament) de les àrees desenganxades sobre un desenganxament friccional (àrees HF) i un major avenç del front de deformació en àrees desenganxades sobre un desenganxament dúctil (àrees LF). Per contra, el fet de treballar amb sorra seca i silicona no proporciona una precisió suficient

en les propietats mecàniques de la cobertora per tal de poder modelitzar la seva complexitat interna: els grans contrastos de comportament mecànic descrits en la columna estratigràfica aflorant, en la que diverses unitats de comportament dúctil hi són presents i controlen el creixement de l'estructura (Fig. R2 i R15), no poden ser modelitzats amb l'ús d'uns pocs materials diferents. Per tal de modelitzar la complexitat interna de la cobertora, doncs, caldria una important quantitat de materials anàlegs diferents i, tot i així, les propietats mecàniques disponibles estarien limitades al nombre de materials diferents emprats en la modelització. Per aquest motiu, es va preferir optar per la Modelització d'Elements Discrets per investigar la importància de l'estratigrafia mecànica i els estrats de creixement en l'evolució del Pico del Águila.

La Modelització d'Elements Discrets (abreviada DEM a partir d'ara), doncs, permet un control precís de la resposta mecànica de cada unitat i, per tant, dóna la possibilitat de configurar una estratigrafia mecànica complexa amb la que modelitzar un gran nombre d'escenaris geològics. Això fa que la DEM sigui un mètode ideal per explorar en detall l'evolució dels anticlinals N-S de les Sierras Exteriores Aragonesas. El mètode permet seguir l'evolució de cadascuna de les partícules que conformen la massa de roca del model mitjançant paràmetres físics tal com els vectors de desplaçament, velocitat i acceleració, posició instantània, etc, a partir dels quals se'n deriva la distribució de la deformació al model. Els models presentats en aquesta Tesi han contribuït amb nous coneixements sobre com la deformació es acomodada de manera diferent en funció del comportament mecànic de cada unitat, portant a importants contrastos en estil estructural entre unitats adjacents de una mateixa cobertora sedimentària. Els models numèrics permeten un control precís dels paràmetres introduïts al model. En els models presentats és de gran importància el control del gruix estratigràfic de les unitats pre-plegament (gruix constant, configurat prèviament a la modelització), i encara més dels estrats de creixement, donat que el mètode és sensible a canvis en l'evolució del sistema dependent del gruix de les unitats i de model en general. Tanmateix, la DEM no contempla la imposició al model de criteris cinemàtics previs. La DEM és una tècnica de modelització d'avenç en la que les propietats físiques de les partícules, les dimensions inicials de la caixa i el gruix estratigràfic són els únics paràmetres

introduïts. En aquest sentit la DEM manté certes similituds amb la modelització analògica, però permet un control més acurat de les propietats mecàniques i una supervisió instantània dels paràmetres cinemàtics i de la distribució de la deformació en qualsevol de les partícules del model. En contrast, els models numèrics presentats són estrictament 2D, donant una representació parcial de la estructura modelitzada (comparable a un tall geològic E-W de l'anticlinal). Malgrat que ja existeixen experiments DEM en 3D (Carmona et al., 2008) aquests són encara molt costosos en termes de consum de temps, especialment per modelitzar escenaris geològics complexos com els anticlinals N-S de les Sierras Exteriores. Per aquest motiu creiem que una aproximació 2D com la presentada en aquesta Tesi ha estat adient per investigar els papers de l'estratigrafia mecànica i els estrats de creixement en una estructura com l'anticlinal del Pico del Águila.

Com ja s'ha dit, el Pico del Águila és certament una estructura 3D, amb un excel·lent grau de preservació dels estrats de creixement. La interferència estructural entre l'anticlinal N-S i l'encavalcament frontal sudpirinenc (E-W) crea doncs una estructura amb una complexa evolució cinemàtica que resulta difícil de representar mitjançant mètodes bidimensionals. Aquests factors motivaren la reconstrucció tridimensional de l'anticlinal i els estrats de creixement, per tal de poder establir un model d'evolució 3D en el que es tingués un control cronològic de la deformació. L'excel·lent grau d'aflorament, preservació i la fàcil accessibilitat van fer del Pico del Águila un cas ideal per portar a terme l'adquisició de dades al camp i una acurada cartografia de traces geològiques. Això va permetre una també acurada reconstrucció en 3D tant de la seqüència pre-plegament com dels estrats de creixement, servint així de punt de partida per realitzar una restitució geomecànica amb la qual conèixer l'evolució estructural de l'anticlinal. Basat en les propietats mecàniques de les roques, doncs, l'algoritme implementat a Dynel3D va suposar una alternativa per portar a terme una restitució en 3D sense necessitat de invocar a criteris cinemàtics complexos dels quals no se'n té un acurat coneixement. Així doncs, el major benefici d'utilitzar la restitució geomecànica és que permet restituir una estructura introduint propietats reals i mesurables de les roques, sense imposar criteris cinemàtics previs, dels quals moltes vegades no se'n té un coneixement

quantitatiu. La densitat, el mòdul de Young, el coeficient de Poisson o la porositat són propietats que es poden mesurar en anàlisis mecànics de materials al laboratori o, altrament, es poden obtenir valors generals publicats en taules de propietats mecàniques per diferents materials comuns a l'escorça terrestre. En qualsevol cas, es poden aconseguir fàcilment valors mesurats o publicats de les propietats mecàniques dels materials i portar a terme una restitució que proporciona un resultat físicament raonable, mecànicament estable, i que està d'acord amb l'evolució cinemàtica derivada a partir d'altres mètodes.

Els principals desavantatges d'aquest mètode estan directament relacionats amb les limitacions tècniques de l'ordinador. L'algoritme implementat a Dynel3D pot requerir una gran quantitat de memòria disponible de l'ordinador, depenent de la resolució desitjada pel model (és a dir, de la mida dels tetraedres que discretitzen la superfície). Això significa que per una estructura d'uns pocs quilòmetres com el Pico del Àguila, un ordinador estàndard permet una resolució d'uns pocs centenars de metres. Això fa d'aquest mètode una opció poc recomanable per estudiar en detall i a aquesta escala cossos geològics que es troben per sota del límit de la resolució del model. Per altra banda, l'algoritme es basa en l'ús de les lleis de l'elasticitat per restituir grans quantitats de deformació no recuperable (inelàstica). Aquest fet també implica certes limitacions, particularment quant a magnitud de la deformació es refereix. L'ús d'un mètode elàstic proporciona valors de deformació que són notablement inferiors que els que es puguin predir mitjançant altres tècniques (p.ex. DEM) i que els valors obtinguts en experiments de camp o laboratori. Per tant, aquest mètode és adient per predir patrons o distribucions de deformació, mecanismes de plegament i dominis potencials de fracturació més que no pas per predir magnituds de deformació o/i estructures mesoscòpiques com patrons o orientacions de fractures en el si de l'estructura.

R.9.2 VALIDACIÓ I INTEGRACIÓ DE LES DIFERENTS TÈCNiques DE MODELITZACIÓ

Tots els experiments presentats en aquest treball han estat, d'una manera o altra, basats en observacions, descripcions i dades adquirides al camp. Essent ja conscients dels avantatges i limitacions de cadascun dels mètodes es pot tenir una imatge més clara de la contribució de cadascun dels models, i ser capaç de donar una resposta raonada quan es qüestiona l'ús d'un o un altre determinat mètode. Validar i integrar els resultats de diferents tècniques, mètodes o aproximacions significa, per tant, reunir les contribucions de cadascun dels models per construir un model unificat d'evolució estructural, però també cobrir els forats que cada tècnica deixa al descobert, de manera que els diferents mètodes es complementen els uns als altres.

En aquest sentit els models analògics van proporcionar nous coneixements a escala regional, donant resposta sobre els processos que van ocasionar la generació de les estructures inicialment arquejades i obliqües, i que finalment resultaren en els anticlinals N-S de les Sierras Exteriores. La modelització es va basar en observacions de camp que indicaven una escassa presència de les fàcies Keuper al nucli dels anticlinals N-S, i va replicar molts dels trets de l'anticlinal a la natura: major aixecament N-S associat a l'emplaçament d'un encavalcament d'orientació E-W en àrees amb poca o cap presència de nivell de desenganxament dúctil, un major avenç del front de deformació en àrees entre anticlinals N-S, desenvolupament d'aquests anticlinals en el bloc superior de l'encavalcament frontal i mostrant una immersió cap a l'orogen, rotació d'eix vertical del bloc superior de l'encavalcament a les zones on els plecs N-S es desenvolupen i morfologia ondulada del front d'encavalcament (Figs. R12 i R18).

Tanmateix, la sorra seca no és un material adient per modelitzar plecs estret i de flancs altament inclinats com els anticlinals N-S de les Sierras Exteriores Aragonesas, els quals es caracteritzen per una estratigrafia mecànica complexa en la que les propietats mecàniques varien al llarg de la columna paral·lelament a la litologia (Figs. R12 i R14). En canvi, els models numèrics d'elements discrets van satisfer aquesta limitació i van reproduir l'estil

estructural del Pico del Àguila després de configurar una estratigrafia mecànica que va simular la seqüència descrita al camp. La manera diferent en la que cada unitat va acomodar la deformació va ser replicada pels models numèrics: falles penetratives i alta deformació interna en les unitats inferiors van cohabitar amb un plegament més suau en les unitats superiors, al mateix temps que els estrats de creixement van acomodar gran quantitat de deformació i van equilibrar l'anticlinal contra les inestabilitats gravitacionals (Fig. R15). El nivell de desenganxament intern va actuar com una barrera, permetent que les unitats superiors es pleguessin mentre les inferiors concentraven molta més deformació mitjançant falles, deformació interna i plegament més intens. Aquests experiments ens van proporcionar un millor coneixement sobre com es comportà l'estratigrafia de les Sierras Exteriores en resposta a l'escurçament de l'orogènia alpina, i com múltiples mecanismes de plegament poden tenir lloc simultàniament en funció de les propietats mecàniques de cadascuna de les unitats estratigràfiques implicades.

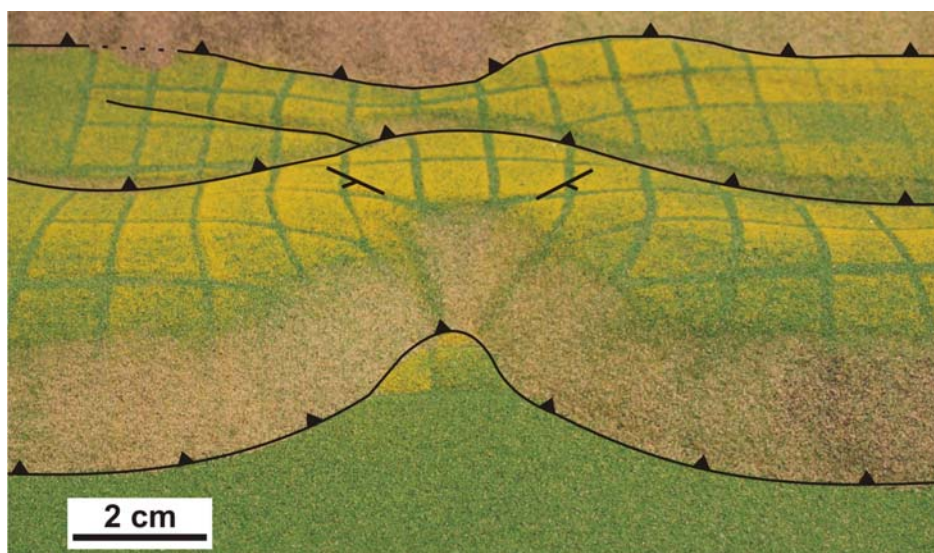


Fig. R18. Fotografia de detall d'una estructura perpendicular a l'orogen formada en el model SExt13 (no presentat en aquesta secció). El front d'encavalcament es caracteritza per una morfologia ondulada en la que es generen anticlinals perpendiculars a les zones de la cobertura desenganxades sobre nivells friccional (sorra).

Malgrat això, l'entorn 2D dels models numèrics no va donar resposta sobre altres processos cinemàtics ben documentats al Pico del Àguila i que impliquen un estudi tridimensional, com són la rotació d'eix vertical de l'anticlinal, la seva relació amb l'encavalcament frontal sudpirinenc i amb les seves estructures associades. L'efecte del lliscament capa sobre capa (*flexural slip*) tampoc es va investigar en aquests models, essent aquest un mecanisme de plegament important descrit a l'àrea d'estudi. Aquestes limitacions van ser superades mercès a la reconstrucció i restitució geomecànica tridimensional del Pico del Àguila, que va afegir la tercera dimensió, va validar i complementar l'evolució estructural i la resposta mecànica predites pels models analògics i numèrics. La restitució va predir de forma independent i sense cap criteri cinemàtic imposat una rotació d'eix vertical de 33°, validant així la rotació ja descrita per estudis paleomagnètics previs (Pueyo et al., 2002; Rodríguez-Pintó et al., 2008) i pels models analògics (Vidal-Royo et al., 2009). Així mateix, la restitució va evidenciar també una diferent evolució de la sedimentació i l'aixecament entre els flancs, així com la incorporació del mecanisme de lliscament de capa sobre capa tal com s'ha descrit al camp (Fig. R16).

Tal com ja havien suggerit els models numèrics 2D, múltiples mecanismes de plegament es van descriure produint-se simultàniament en diferents unitats, depenent de les propietats mecàniques de cadascuna d'elles. A més, la restitució va posar de manifest que també es produeixen una multitud de mecanismes de plegament simultàniament dins d'una mateixa unitat, depenent del domini estructural del plec en el que es trobi. Aquesta combinació de mecanismes de plegament en diferents unitats i dominis estructurals dóna lloc a una complexa distribució de la deformació a l'estructura, en la que les propietats mecàniques de les unitats causaran que la deformació es centri en un o altre domini i, per tant, que es deformin donant lloc a un determinat estil estructural (Fig. R17).

Per altra banda, les limitacions associades a la restitució geomecànica realitzada amb Dynel3D ja han estat esmentades prèviament. La falta de informació associada al límit de resolució dels tetraedres queda parcialment coberta pels models numèrics 2D, els quals informen de una resposta mecànica diferent per cadascuna de les unitats modelitzades. Les limitacions associades a

l'ús d'un model elàstic per restituir grans quantitats de deformació inelàstica (no recuperable) es solucionen restituint i sumant petits increments de deformació, tot incloent l'efecte de les falles, els nivells de desenganxament i el lliscament de capa sobre capa. D'aquesta manera, es requereix que cada volum es restitueixi elàsticament, però a trets generals el model experimenta deformacions permanents i finites que es manifesten per mitjans de desplaçaments de falles, desenganxaments i lliscaments de capa sobre capa (Maerten and Maerten, 2006, i Guzowski et al., 2009 que utilitzen una tècnica similar de restitució).

En general, cadascun dels mètodes de modelització presentats en aquesta Tesi afronta un nou interrogant de l'evolució estructural dels anticlinals N-S de les Sierras Exteriores, aportant nous coneixements que estan d'acord amb les observacions fetes al camp i porten un pas més enllà els aspectes que romanien descoberts per altres tècniques. En altres paraules, els models presentats contribueixen amb nous aspectes sobre la geologia de les Sierras Exteriores Aragonesas, validen els resultats obtinguts mitjançant altres mètodes i estudis, i integren part de un model unificat i més robust sobre la història geològica de les Sierras Exteriores Aragonesas (Fig. R19).

R.9.3 L'ANTICLINAL DEL PICO DEL ÁGUILA: MODEL INTEGRAT D'EVOLUCIÓ ESTRUCTURAL

Els resultats dels diferents models presentats en aquesta Tesi, combinats amb els estudis previs que s'han portat a terme a la regió en diferents disciplines, ens ha permès presentar un model integrat d'evolució estructural per l'anticlinal del Pico del Águila.

L'anticlinal del Pico del Águila és un plec de desenganxament sobre una complexa geometria irregular de fàcies Muschelkalk i Keuper (Triàsic mig i superior, respectivament).

Prèviament a la deposició de la cobertora Cretàtica-Terciària l'àrea ja estava caracteritzada per una complexa estructura i una llarga història

geològica. D'acord a les reconstruccions paleogeogràfiques (López-Gómez et al., 2002; Castillo-Herrador, 1974; Jurado, 1990; Salvany, 1990) la regió es localitzava en un alt de la conca extensional Triàsica, en el qual va tenir lloc una molt baixa taxa de sedimentació durant el Triàsic superior. Aquesta posició estructural va influenciar el baix i irregular gruix estratigràfic de les fàcies Keuper (formades per lutites vermelles i capes d'evaporites) observades a l'àrea i el complex pas lateral amb les fàcies pre- i sin-extensives del Muschelkalk (fàcies M2: lutites, margues i evaporites; M3: dolomies i calcàries dolomítiques) (Fig. R19a). A més, el patró estructural al Triàsic superior es presumeix complex, i la fracturació penetrativa que caracteritza aquestes unitats avui dia es creuen parcialment heretades del patró estructural d'edat Triàsica. Aquest marc geològic tan complex va donar com a resultat un substrat Triàsic mecànicament irregular i heterogeni, a sobre del qual la cobertora Cretàcica-Terciària es va dipositar.

Va ser fa uns 42.67 Ma (Lutecià superior) (Poblet & Hardy, 1995) quan l'anticlinal del Pico del Àguila va començar a créixer. Donades les heterogeneïtats mecàniques descrites al desenganxament Triàsic, l'anticlinal es va generar formant un alt angle (entre 69° i 57° , depenent de quin valor de rotació total es prengui) respecte la tendència estructural pirinenca E-W (Fig. R19b). La cobertora sedimentària va experimentar un major aixecament d'orientació NNW-SSE a les àrees amb menor gruix de fàcies Keuper (baixa proporció de gruixos entre la cobertora i el desenganxament dúctil), formant un baix angle amb la direcció de transport tectònic dels Pirineus (aproximadament N-S). Aquests grans contrastos mecànics en el desenganxament basal van produir també la rotació d'eix vertical en sentit de les busques, causant que el front de deformació avancés a una velocitat diferent en funció de la naturalesa mecànica del nivell basal de desenganxament Triàsic en diferents àrees. Donada la complexitat mecànica de la cobertora sedimentària, al llarg de la qual s'ha descrit una resposta mecànica heterogènia, l'escurçament N-S va ser acomodat per plegament en comptes de generar rampes d'encavalcament obliqües, formant un petit plec de desenganxament incipient a sobre del qual es dipositaven sediments carbonàtics en un ambient de plataforma marina poc profunda (seqüència deposicional 3 de la Formació Guara).

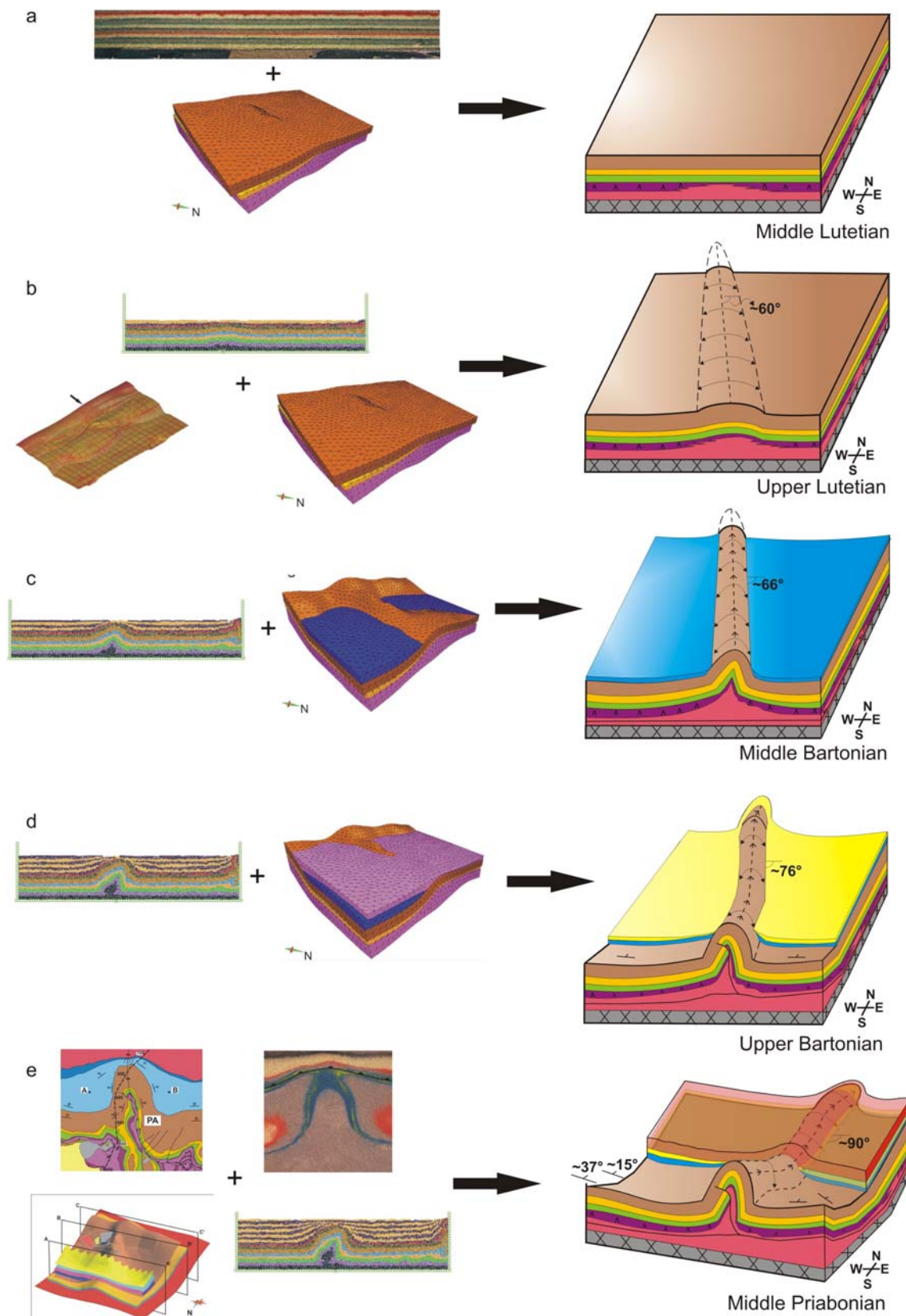


Fig. R19. Blocs - diagrama resumint l'evolució estructural de l'anticlinal del Pico del Águila tal com s'ha deduït a partir dels resultats de la modelització, de la reconstrucció 3D i dels estudis previs sobre la regió: a) estadi no deformat (Lutecià mig); b) Lutecià superior, inici de la deformació; c) Bartonianà mig, deposició de la GS-I; d) Bartonianà superior, deposició de la GS-II; e) Priabonianà mig, deposició de la Formació Campodarbe (post-plegament), cessament de la deformació.

Fa aproximadament 41.52 Ma es va produir una transició brusca d'ambient sedimentari, passant d'una plataforma carbonatada poc profunda a un ambient transicional de talús, començant la deposició de les margues blaves i azoiques, riques en glauconita, de la GS-I de la Formació Arguis. La deposició d'aquests materials va anar acompanyada d'una gran taxa d'aixecament del plec, molt superior a la taxa de sedimentació. Això va resultar en la formació de geometries en *onlap* i en un aprimament dels materials de la GS-I sobre els flancs de l'anticlinal definits per la seqüència 3 de la Formació Guara, que van romandre sense descoberts sense que els sediments de la GS-I assolissin la cresta de l'anticlinal (Fig. R19c). Aquest gran aixecament, la creació d'espai disponible per a la sedimentació i el cicle transgressiu que va caracteritzar la deposició de les Formacions Guara i Arguis (Millán et al., 1994; Castellort et al., 2003) van controlar el canvi de fàcies sedimentàries que hi ha entre les calcàries de plataforma somera de la Formació Guara i les margues de talús de la Formació Arguis. En aquest temps i fins fa uns 40.04 Ma la taxa de sedimentació va créixer progressivament. El front d'encavalcament sudpirinenc va començar a generar-se, afegint un lleuger basculament de l'anticlinal cap al nord (Fig. R19c).

Fa uns 40.04 Ma va donar-se un canvi en l'ambient deposicional que va implicar el final de la deposició de la GS-I. Diversos mecanismes de plegament van caracteritzar l'evolució estructural en aquesta etapa: a la GS-I predominà la migració de xarnera en els sinclinals associats a l'anticlinal, mentre que una combinació d'allargament i rotació de flanc es va produir al llarg de la part E-W dels flancs de l'anticlinal. Al mateix temps, a la Formació Guara l'allargament de flanc va predominar en el tancament periclinal i la rotació de flanc ho va fer al llarg de la part N-S dels flancs de l'anticlinal (Fig. R19d). Aquesta complexa interacció de mecanismes de plegament entre diferents unitats i dominis estructurals va caracteritzar tot el creixement del plec, i va portar als contrastos d'estil estructural que es descriuen avui dia al camp: un encavalcament intern paral·lel a la tendència estructural del plec afecta a la seqüència compresa entre les fàcies Muschelkalk i la seqüència 2 de Guara, fallant-la i deformant-la de forma complexa, mentre que la sèrie suprajacent formada per la seqüència 2 de Guara fins a la Formació Campodarbe es troba plegada més suaument. Amb

més escurçament l'emplaçament de la rampa de l'encavalcament frontal sudpirinenc causa un increment en la immersió del plec sincrònicament a la rotació progressiva de l'anticlinal en el sentit de les busques (Fig. R19d).

Fa uns 37.74 Ma l'ambient deposicional va canviar lleugerament, descrivint a partir de llavors la presència de foraminífers bentònics, briozous, bivalves i equínids (Millán et al., 1994). En general, l'anticlinal havia rotat ja un total de 6° respecte el inici de la deformació. Tanmateix, tal com mostra la restitució, el lliscament capa sobre capa accentua aquesta rotació de les capes superiors respecte les inferiors, donat que s'observa una rotació lleugerament superior en les unitats més joves. L'anticlinal, per tant, no va rotar com un bloc rígid: els contrastos mecànics en el desenganxament basal van conduir la rotació general de l'estructura a mida que l'encavalcament frontal sudpirinenc avançava, però el lliscament capa sobre capa entre unitats va causar una rotació incremental lleugerament superior a mida que es puja en la sèrie estratigràfica.

D'acord amb Millán et al (1994), després de la deposició de la GS-III fa uns 37.17 Ma l'ambient deposicional va canviar a una rampa carbonatada de baix angle, amb una sedimentació consistent en fàcies margoses (fàcies de rampa externa) interestratificades amb fàcies carbonàtiques (fàcies de rampa mitja) amb molta presència de comunitats bentòniques de pectínids. Es va produir una rotació addicional d'uns 10° respecte a l'estadi anterior així com un augment de la immersió del plec cap al nord d'uns 4°. Ambdós increments indiquen una activitat creixen en l'emplaçament de l'encavalcament frontal sudpirinenc durant aquest període.

La deposició de la GS-IV (Formació BelsuéAtarés, fa uns 36.6 Ma), en canvi, no va implicar un augment significatiu de la rotació (uns 2° aproximadament) i de la immersió (uns 4°) de l'anticlinal. Aquesta va ser la primera seqüència deposicional que va cobrir tot l'anticlinal (Fig. R19e), i va implicar un canvi en el sistema deposicional cap a un ambient deltaic en el que lòbuls deltaics progradaven sobre margues de prodelta, i que es va caracteritzar per la sedimentació de gresos granocreixents i fines seqüències margoses (Millán et al., 1994). Degut al lliscament capa sobre capa descrit als estrats de creixement, les GS van acomodar una deformació moderada, amb el màxim de

deformació concentrat a la seqüència pre-plegament, principalment degut a l'emplaçament de la rampa de l'encavalcament frontal sudpirinenc sota l'estructura de l'anticlinal.

Finalment, des de la GS-IV fins al cessament de la deformació (estimat fa uns 34.8 ± 1.72 Ma segons [Poblet and Hardy, 1995](#)) el marc deposicional va canviar d'ambients fluviodeltaics a fluvials, caracteritzat per la deposició i sedimentació dels gresos, lutites i conglomerats de la Formació Campodarbe. La rotació registrada en aquest estadi va ser important, d'uns 15° respecte l'estadi anterior, així com també va ser-ho l'increment en la immersió del plec, d'uns 18° (Fig. R19e). Això indica que l'emplaçament de la rampa de l'encavalcament sudpirinenc va mostrar una major activitat durant aquest període. El lliscament capa sobre capa va influenciar un plegament i una rotació diferents entre les diverses unitats que va generar l'asimetria descrita en la geometria actual del plec. També durant aquest últim estadi deformatiu es van produir les falles extensives en la cresta de l'anticlinal que s'observen al llarg de tota la seqüència d'estrats de creixement, principalment degudes a un estirament de l'arc exterior del plec i a inestabilitats gravitacionals de la cresta de l'anticlinal.

R.10 CONCLUSIONS

En aquesta Tesi es presenten diferents tècniques de modelització, les quals s'han integrat posteriorment per tal de conèixer millor l'evolució estructural de l'anticlinal del Pico del Águila i, per tant, dels anticlinals N-S de les Sierras Exteriores Aragonesas.

Els models analògics han proporcionat nous coneixements sobre la formació i evolució d'estructures obliqües i transversals a l'orogen. Basat en una distribució irregular del nivell basal de desenganxament Triàsic, els models simulen les característiques dels plecs N-S de les Sierras Exteriores Aragonesas: generació sincrònica a l'emplaçament de l'encavalcament frontal sudpirinenc, major relleu estructural comparat amb les estructures paral·leles a l'orogen, absència d'un desenganxament dúctil representatiu al nucli de les estructures,

falles penetratives a les unitats inferiors i plegament de les unitats superiors, immersió dels anticlinals cap a l'orogen i tancament periclinal meridional no encavalcat per l'encavalcament frontal sudpirinenc.

Els models d'elements discrets s'han emprat per testar la influència d'una estratigrafia mecànica complexa i la presència d'estrats de creixement en la generació i evolució de l'anticlinal del Pico del Águila. La variabilitat mecànica de la sèrie estratigràfica ha implicat una gran i complexa deformació en les unitats incompetents, mentre que les unitats més competents estan subjectes a una deformació més distribuïda i a plegament simple. Com a resultat de les diferents respostes mecàniques a l'escurçament, és difícil explicar l'evolució d'una estructura com el Pico del Águila en termes de paràmetres cinemàtics. La presència dels estrats de creixement redueix els efectes de l'estirament, de les falles extensives i de les inestabilitats gravitacionals a la cresta de l'anticlinal. La càrrega creada pels sediments sin-cinemàtics implica també que la deformació quedi més confinada al nucli de l'estructura, creant així un plec més estret que en cas d'absència de sedimentació sin-cinemàtica.

La reconstrucció i restitució 3D de l'anticlinal del Pico del Águila també suggereix que el creixement d'un plec de desenganxament en 3D està caracteritzat per la combinació de múltiples mecanismes de plegament produint-se simultàniament en diferents unitats i dominis estructurals durant la formació de l'anticlinal, depenent de les propietats mecàniques dels materials implicats en la deformació. Així doncs, la comprensió de la cinemàtica del plegament no hauria de passar per alt la consideració del comportament mecànic de les roques per tenir un coneixement més encertat de l'evolució d'una estructura.

La correcta integració de les diferents tècniques de modelització està òbviament relacionada amb les aportacions que cada model fa, però també amb les limitacions de cadascun dels mètodes. En aquest sentit, en aquesta Tesi es presenta un model d'evolució estructural per l'anticlinal del Pico del Águila basat en la integració de models estructurals 3D, analògics, numèrics i restitucions geomecàniques de l'estructura, als quals se'ls hi afegeixen les aportacions proporcionades per treballs clau previs sobre la regió. Combinant

múltiples disciplines i mètodes de modelització, per tant, aporta sense dubte una millor comprensió de l'evolució d'una estructura així com dels processos que menaren la generació i evolució dels anticlinals de desenganxament N-S de les Sierras Exteriores Aragonesas dels Pirineus Meridionals.

R.10.1 PERSPECTIVES D'AVENÇ

Després de diversos anys d'estudiar els anticlinals N-S de les Sierras Exteriores Aragonesas han aparegut moltes preguntes, reptes i dificultats, alguns dels quals s'han pogut solucionar satisfactòriament mentre que altres han continuat sense resposta. A més, s'han encetat investigacions paral·les no recollides en aquest volum i que han hagut de ser apartades en algun moment o altre, bé sigui per falta de temps, per falta de recursos humans, o senzillament perquè no s'ha pogut trobar un enllaç directe amb l'objectiu global d'aquesta Tesi. Una vegada acabada aquesta etapa, però, potser es disposarà de l'ocasió de recuperar-les i dedica'ls-hi el temps i l'esforç necessari. Aquestes qüestions són:

a) La reconstrucció i restitució seqüencial 3D dels anticlinals N-S veïns al Pico del Águila, com són l'anticlinal de Bentué de Rasal i el de Gabardiella. Portant a terme aquest exercici en aquestes estructures veïnes proporcionaria una millor visió més global de la rotació d'eix vertical dels anticlinals a una escala més regional, donant eines suficients per comparar l'evolució de la deformació al llarg de la traça del front encavalcant sudpirinenc.

b) Un acurat estudi de camp de la fracturació associada a l'anticlinal del Pico del Águila. En Manoel Valcárcel ja va realitzar un primer estudi de les fractures associades a l'anticlinal, en el que va obtenir resultats prometedors per comparar amb el patró de deformació derivat a partir de la restitució geomecànica i els models mecànics 2D. Tanmateix, caldria un estudi més detallat, amb una major inversió de temps i recursos per aconseguir més estacions de mesura i tenir així un millor control de com les fractures es distribueixen arreu de l'anticlinal.

c) Una eina automatitzada per reconstruir la geometria dels estrats de creixement. Les seqüències deposicionals reconstruïdes en els estrats de creixement del Pico del Àguila es van realitzar aplicant el mètode dels dominis de cabussament individualment per cada horitzó. Tanmateix, aquest mètode implica un gran consum de temps i pot esdevenir tediós si es disposa d'una gran quantitat de dades (centenars o milers de mesures de cabussament). Mercès a les excel·lents condicions d'aflorament i accessibilitat, les seqüències de creixement reconstruïdes poden esdevenir una excel·lent base de partida a partir de la qual desenvolupar un mètode automatitzat de reconstrucció d'estrats de creixement a partir de paràmetres físics mesurables de les roques.

d) El reprocessat dels perfils sísmics disponibles a la zona d'estudi. Les campanyes d'adquisició sísmica disponibles a la zona van ser realitzades durant els anys 60 del segle XX. Com a resultat, els perfils sísmics són de poca qualitat, i no permeten una interpretació acurada de la geometria de les unitats, particularment en els nivells més somers dels estrats de creixement. Això esdevé una gran limitació per poder entendre correctament la geometria de les Sierras Exteriores Aragonesas en profunditat. Malgrat que això quedi parcialment compensat per unes magnífiques condicions d'aflorament, un reprocessat i filtrat dels perfils sísmics amb les eines actuals de processat sísmic milloraria de forma destacable la interpretació i comprensió dels anticlinals N-S en profunditat.

R.11 REFERÈNCIES

Agterberg, F.P., 1967. Computer techniques in geology. *Earth-Science Reviews*, 3, 47-77.

Amilibia, A., McClay, K.R., Sàbat, F., Muñoz, J.A., Roca, E., 2005. Analogue Modelling of Inverted Oblique Rift Systems. *Geologica Acta*, 3 (3), 251-271.

Bonini, M., 2003. Detachment folding, fold amplification, and diapirism in thrust wedge experiments. *Tectonics*, 22(6), 1065, doi:10.1029/2002TC001458.

Borraccini, F., De Donatis, M., Di Bucci, D., Mazzoli, S., 2002. 3D Model of the active extensional fault system of the high Agri River valley, Southern Apennines, Italy. In: Jessell, M. J. (ed.). *General Contributions: 2002. Journal of the Virtual Explorer*, 6, 1-6.

Cadell, H.M., 1888. Experimental Researches in mountain building. *Royal Society of Edinburgh Transactions*, 35, 337-360.

Cagnard, F., Brun, J.P., Gapais, D., 2006. Modes of thickening of analogue weak lithospheres. *Tectonophysics*, 421 (1-2), 145-160.

Camerlo, R.H., Benson, E.F., 2006. Geometric and seismic interpretation of the Perdido fold belt: Northwestern deep-water Gulf of Mexico. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 90 (3), 363-386.

Carmona, A., Clavera, R., Gratacós, O., Hardy, S., 2008. Combining Discrete Element Modelling and process-based models: initial results. *Bolletino di Geofisica teorica ed applicata*, 49, 358-364.

Carrera, N., Muñoz, J.A., Roca, E., 2009. 3D reconstruction of geological surfaces by the equivalent dip-domain method: An example from field data of the Cerro Bayo Anticline (Cordillera Oriental, NW Argentine Andes). *Journal of Structural Geology*, 31, 1573-1585.

Castelltort, S., Guillocheau, F., Robin, C., Rouby, D., Nalpas, T., Lafont, F., Echard, R., 2003. Fold control on the stratigraphic record: a quantified sequence stratigraphic study of the Pico del Aguila anticline in the southwestern Pyrenees (Spain). *Basin Research*, 15, 527-551.

Castillo-Herrador, F., 1974. Le Trias évaporitique des bassins de la Vallée de l'Ebre et de Cuenca. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 16, 49-63.

Daudre, A., 1879. Etudes Synthétiques de Géologie Expérimentale, pt. 1. Paris, Dunod, 828 p.

Felleman, J., 1990. There's a GIS in your future. Government Information Quarterly, 7 (3), 261-267.

Fernández, O., Muñoz, J.A., Arbués, P., Falivene, O., Marzo, M., 2004a . Three-dimensional reconstruction of geological surfaces: An example of growth strata and turbidite systems from the Ainsa basin (Pyrenees, Spain). American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 88 (8), 1049-1068.

Fernández, O., 2004b. Reconstruction of geological structures in 3D: An Example from the southern Pyrenees. Doctoral Thesis, Departament de Geodinàmica i Geofísica, Universitat de Barcelona, Barcelona, Spain, 376 pp.

Finch, E., Hardy, S., Gawthorpe, R.L., 2003. Discrete element modelling of contractional fault-propagation folding above rigid basement blocks. Journal of Structural Geology, 25, 515-528.

Finch, E., Hardy, S., Gawthorpe, R.L., 2004. Discrete element modelling of extensional fault-propagation folding above rigid basement fault blocks. Basin Research, 16, 489-506.

Ford, M., Le Carlier de Veslud, C., Bourgeois, O., 2007. Kinematic and geometric analysis of fault-related folds in a rift setting: The Dannemarie basin, Upper Rhine Graben, France. Journal of Structural Geology, 29, 1811-1830.

Gente, P., Auzende, J.M., Renard, V., Fouquet, Y., Bideau, D., 1986. Detailed geological mapping by submersible of the East Pacific Rise axial graben near 13° N. Earth and Planetary Science Letters, 78 (2-3), 224-236.

Guzofski, C.A., Mueller, J.P., Shaw, J.H., Muron, P., Medwedeff, D.A., Bilotti, F., Rivero, C., 2009. Insights into the mechanisms of fault-related folding provided by volumetric structural restorations using spatially varying mechanical constraints. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 93 (4), 479-502.

Hall, J. Sir, 1815. On the vertical position and convolutions of certain strata and their relation with granite. Royal Society of Edinburgh Transactions, 7, 79-108.

Harbaugh, J.W., Merriam, D.F., 1968. Computer applications in stratigraphic analysis. John Wiley Sons Inc., New York, USA, 282 p.

Hardy, S., Finch, E., 2005. Discrete-element modelling of detachment folding. Basin Research, 17, 507-520.

Hardy, S., Finch, E., 2007. Mechanical stratigraphy and the transition from trishear to kink-band fault-propagation fold forms above blind basement thrust faults: A discrete-element study. Marine and Petroleum Geology, 24, 75-90.

Hill, K.C., 1991. Structure of the Papuan Fold Belt, Papua New Guinea. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 74 (5), 857-872.

Holl, J.E., Anastasio, D.J., 1993. Paleomagnetically derived folding rates, southern Pyrenees, Spain. Geology, 21 (3), 271-274.

Huyghe, D., Mouthereau, F., Castelltort, S., Filleaudeau, P.Y., Emmanuel, L., 2009. Paleogene propagation of the southern Pyrenean thrust wedge revealed by finite strain analysis in frontal thrust sheets: Implications for mountain building. Earth and Planetary Science Letters, doi:10.1016/j.epsl.2009.10.002.

IGME, 1992. Mapa Geológico de España. Hoja 248, Apiés. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, Unpublished 36 pp report + 1:50000 map.

Jurado, M.J., 1990. El Triásico y el Liásico basal evaporíticos del subsuelo de la cuenca del Ebro. In: Ortí, F., Salvany, J.M. Formaciones evaporíticas de la Cuenca del Ebro y cadenas periféricas, y de la zona de Levante. Enresa, Madrid, 21-28.

Koyi, H.A., 1997. Analogue modelling: from a qualitative to a quantitative technique – a historical perspective. *Journal of Petroleum Geology*, 20, 223-238.

Krumbein, W.C., Graybill, F.A., 1965. Application of the general linear model to Map Analysis. *An Introduction to Statistical Models in Geology*, McGraw-Hill, New York, 319-357.

López-Gómez, K., Arche, A., Pérez-López, A., 2002. Permian and Triassic. In: Gibbons, W., Moreno, T. (eds.). *The Geology of Spain*. The Geological Society of London, 185-212.

Maerten, L., Maerten, F., 2006. Chronologic modeling of faulted and fractured reservoirs using geomechanically based restoration: Technique and industry applications. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 90 (8), 1201-1226.

Millán, H., 1995. Estructura y Cinemática del frente de cabalgamiento surpirenaico en las Sierras Exteriores Aragonesas. *Doctoral Thesis*, Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 330 pp + annex.

Millán, H., Aurell, M., Meléndez, A., 1994. Synchronous detachment folds and coeval sedimentation in the Prepyrenean External Sierras (Spain): a case study for a tectonic origin of sequences and system tracts. *Sedimentology*, 41 (5), 1001-1024.

Mitra, S., 2002. Structural Models of Faulted Detachment Folds. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 86 (9), 1673-1694.

Nalpas, T., Gapais, D., Vergés, J., Barrier, L., Gestain, V., Leroux, G., Rouby, D., Kermarrec, J.J., 2003. Effects of rate and nature of synkinematic sedimentation on the growth of compressive structures constrained by analogue models and field examples. In: McCant, T., Saintot, A. (eds.). *Tracing Tectonic Deformation Using the Sedimentary Record*. Geological Society, London, Special Publications 208, 307-319.

Nalpas, T., Györfi, I., Guillocheau, F., Lafont, F., Homewood, P., 1999. Influence de la charge sédimentaire sur le développement d'anticlinaux synsédimentaires. Modélisation analogique et exemple du terrain (bordure sud du bassin de Jaca). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 170 (5), 733-740.

Novoa, E., Suppe, J., Shaw, J.H., 2000. Inclined-Shear Restoration of Growth Folds. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 84 (6), 787-804.

Place, D., Mora, P., 2001. A random lattice solid model for simulation of fault zone dynamics and fracture processes. In: Mulhaus, H.B., Dyskin, A.V., Pasternak, E. (eds.). *Bifurcation and Localisation Theory for Soils and Rocks '99*. A.A. Balkema, Rotterdam/Brookfield.

Poblet, J., Hardy, S., 1995. Reverse modelling of detachment folds, application to the Pico del Aguila anticline in the South Central Pyrenees (Spain). *Journal of Structural Geology*, 17, 1707-1724.

Poblet, J., McClay, K.R., Storti, F., Muñoz, J.A., 1997. Geometries of syntectonic sediments associated with single-layer detachment folds. *Journal of Structural Geology*, 19 (3-4), 369-381.

Pueyo, E.L., Millán, H., Pocoví, A., 2002. Rotation velocity of a thrust: a paleomagnetic study in the External Sierras (Southern Pyrenees). *Sedimentary Geology*, 146 (1), 191-208.

Rodríguez-Pintó, A., Pueyo, E.L., Pocoví, A., Barnolas, A., 2008. Cronología de la actividad rotacional en el sector central del frente de cabalgamiento de Sierras Exteriores (Pirineo Occidental). *Geotemas*, 10, 1207-1210.

Salvany, J.M., 1990. Introducción a las evaporitas triásicas de las cadenas periféricas de la cuenca del Ebro: Catalánides, Pirineo y Región Cantábrica. In: Ortí, F., Salvany, J.M. (eds.). *Formaciones evaporíticas de la Cuenca del Ebro y cadenas periféricas, y de la zona de Levante*. Enresa, Madrid, 21-28.

Scheck, M., Bayer, U., 1999. Evolution of the Northeast German Basin - inferences from a 3D structural model and subsidence analysis. *Tectonophysics*, 313, 145-169.

Soler, M. , Puigdefàbregas, C., 1970. Líneas generales de la geología del Alto Aragón Occidental. *Pirineos*, 96, 5-20.

Tanner, D.C., Berhmann, J.H., Dresmann, H., 2003. Three-dimensional retro-deformation of the Lechtal Nappe, Northern Calcareous Alps. *Journal of Structural Geology*, 25, 737-748.

Vidal-Royo, O., Koyi, H.A., Muñoz, J.A., 2009. Formation of orogen-perpendicular thrusts due to mechanical contrasts in the basal décollement in the Central External Sierras (Southern Pyrenees, Spain). *Journal of Structural Geology*, 31, 523-539.

Vidal-Royo, O., Hardy, S., Muñoz, J.A., 2010. The roles of complex mechanical stratigraphy and syn-kinematic sedimentation in fold development: Insights from discrete-element modelling and application to the Pico del Águila anticline (External Sierras, Southern Pyrenees). In: Poblet, J., Lisle, R.J. (eds.). *Kinematic Evolution and Structural Styles of Fold-and-Thrust Belts*, Special Publication of the Geological Society, *accepted*.

Vidal-Royo, O., Cardozo, N., Muñoz, J.A., Hardy, S., Maerten, L., 2010. Multiple mechanisms driving detachment folding as deduced from 3D reconstruction and geomechanical restoration: The Pico del Águila anticline (External Sierras, Southern Pyrenees). *Basin Research*, *submitted*.

Weijermars, R., 1986. Flow behaviour and physical chemistry of bouncing putties and related polymers in view of tectonic laboratory applications. *Tectonophysics*, 124, 325-358.

Wilsher, W.A., de Wit, M.J., Marrao, E., 1989. A GIS solution for Gondwana geoscientific data. *Journal of African Earth Sciences*, 9 (2), 371-374.

Zanchi, A., Salvi, F., Zanchetta, S., Sterlacchini, S., Guerra, G., 2009. 3D reconstruction of complex geological bodies: Examples from the Alps. *Computers and Geosciences*, 35, 49-69.