

Hiperestentsioa: kontinenteen apurketa ulertzeko eredu berri bat

(Hyperextension: a new model to comprehend continental breakup)

Martin Ladron de Guevara*¹, Arantxa Bodego¹, Eneko Iriarte²

¹ Geologia Saila, Zientzia eta Teknologia Fakultatea (UPV/EHU)

² Laboratorio de Evolución Humana, Dpto. de Historia, Geografía y Comunicación. Universidad de Burgos

LABURPENA: Kontinenteen apurketa luzaroan ikertu den prozesu geologikoa da. *Rifting* deritzen prozesu horrek milioika urte irautes ditu, eta kontinente-ertzetan, mendikateetan eta bestelako ingurune geologikoetan topatzen dira fenomeno tektoniko horren aztarnak. Plaka tektonikoen banaketaren interpretazioa, ordea, eboluzionatuz doa ikertzaileen ulermenaren eta aurrerapen teknologikoen arabera. Hiperestentsioaren ideia da interpretazio horren azken berrikuntza. Ideia hori litosfera kontinentalaren deformazio polifasikoan baneratzten da, litosferaren muturreko luzapenean oinarrituz, hain zuzen. Ertz egonkorretan eta gerriko orogenikoetan identifikaturiko egitura geologiko eta eremu estruktural bereizgarriek ahalbidetzen dute fenomeno horren bilakaeraren nolokotasuna definitzea. Magman txiroak bezala ezagutzen diren ertz egonkorretako eremu horiek dira hurbileko domeinua, *necking* domeinua, urruneko domeinua edo hiperluzatua eta kanpoko domeinua. Domeinu horietako bakoitza *rifting*aren deformazio faseekin lotzen da; fase horiek litosfera kontinentalaren luzapena, mehetzea, mantuaren azaleratzea eta lurrazal ozeanikoaren zabaltea dira. Esan bezala, iraganean hiperluzatutako arroetan ari da garatzen ikerketa, eta hipotesi horren bitartez ulertzen hasia da, honezker, Euskokantauriar arroa (EKA) baneratzten duen Iberia eta Eurasia arteko Mesozoikoko rift-sistemaren garapena. Urteetan arroan bildutako datuek, behintzat, horretara bultzatzen dute. Pirinioen mendebaldean deskribaturiko mantuaren azaleratzeak eta arroan deskribaturiko hamaika prozesu indartu dute Kretazeoko *rifting*ean hiperestentsioak izan zezakeen garrantzia; azken horrek, gainera, garai hartako EKAREN eboluzio geologikoen paradigma argitu dezake.

HITZ GAKOAK: *rifting*, hiperestentsio, plaken tektonika, Euskokantauriar arro.

ABSTRACT: Continental breakup is a geological process which has been deeply learnt. The keys of that tectonic phenomena, the so-called *rifting* process that lasts millions of years, can be found worldwide within rifted margins, mountain chains and other geological settings. However, the interpretation of tectonic plate rupture evolves while researcher's comprehension and technology advance. Hyperextension is the last update within that interpretation. This revolutionary idea involves the extreme polyphasic extensional deformation of the continental lithosphere. Characteristic geological structures and structural domains identified within passive margins and orogenic belts, allow to define the evolution of this phenomena. Domains such as the proximal domain, necking domain, distal or hyperextended domain and outer domain are distinguishing features within magma poor rifted margins. These domains are linked to specific deformation phases during *rifting*, being stretching and thinning of continental lithosphere, mantle exhumation and oceanic crust spreading part of these process. As said, research is being carried out in hyperextended basins, and the evolution of the Iberia-Eurasia Mesozoic rift system, which involves the Basque-Cantabrian Basin (BCB), is already being understood within that hypothesis. Data collected over years in the BCB, at least, suggest that. Mantle exhumation described in the western Pyrenees and several processes linked to that within the BCB, reinforces the significance that hyperextension could have occurred during the Cretaceous *rifting*, shedding light to the paradigm concerning the evolution of the BCB.

KEYWORDS: *rifting*, hyperextension, plate tectonics, Basque-Cantabrian Basin.

* **Harremanetan jartzeko / Corresponding author:** Martin Ladron de Guevara. Geologia Saila, Zientzia eta Teknologia Fakultatea (UPV/EHU). – martin.ladrondeguevara@ehu.es – https://orcid.org/0000-0001-7879-0709

Nola aipatu / How to cite: Ladron de Guevara, Martin; Bodego, Arantxa; Iriarte, Eneko (2021). «Hiperestentsioa: kontinenteen apurketa ulertzeko eredu berri bat». *Ekaia*, 40, 2021, 223-245. (https://doi.org/10.1387/ekaia.21872).

Jasotze-data: 2020, ekainak 30; Onartze-data: 2021, urtarrilak 27.

ISSN 0214-9753 - eISSN 2444-3581 / © 2021 UPV/EHU



Lan hau Creative Commons Aitortu-EzKomertziala-LanEratorririkGabe 4.0 Nazioartekoa lizentzia baten mende dago

1. SARRERA

XX. mendearen hasieran Alfred Wegener meteorologo eta geofisikari alemanak lehendabizikoz iradoki zuen kontinenteen jitoa izan zen 50 urte beranduago garatuko zen plaken tektonikaren teoriaren aurrekaria. Egun, komunitate zientifikoak aho batez onartzen du teoria hori, Lurreko prozesu natural asko uler baitaitezke bertan oinarriturik. Teoria horren gainean eraiki da gaur egun gizarteak duen jakinduria geologikoaren zati handi bat, eta seguruenik horrela izaten jarraituko du etorkizunean ere. Plaken tektonikaren barneko prozesu primario horietako bat da *riftinga*: indar dibergenteen eraginpean litosfera kontinentalak luzatu, mehetu eta zatikatu egiten da, plaken arteko muga berriak sortuz. Munduko hidrokarburo-erreserben zati handi bat garapen-maila ezberdineko rift-sistemei lotuta dago. Ereku geologiko berezi horiek gordetzen duten potentzial ekonomikoa handia da, eta, horregatik, xeheki aztertu dira hidrokarburo-enpresa esploratzaileen aldeetik urteetan zehar. Dena dela, industria horri lotuta, 70eko hamarkadan sortutako kontinenteen banaketari buruzko eredu iraultzaile honek eraldaketa nabarmenak izan ditu. Aurrerakuntza teknologikoen poderioz, datu berri asko isuri dira mahai gainera. Hasierako ideiatik abiatuz, *riftinga* ulertzeko ereduak hamaika aldaketa izan dituzte: kontzeptu eta hipotesi berriak txertatu dira, eta pixkanaka ulertu dira hasieran ulergaitzak ziren fenomenoak.

Idea horietako bat da azken hamarkadotan hainbat ikertzailek eskuartearen darabilten hiperestentsioaren hipotesia [1-3]. Ideia horrek datu geofisiko, geokimiko eta sedimentologiko berriak txertatu ditu urteetan zehar garatzen joan den *rifting*-ereduaren urruneko gune eta gutxi ezagunean [4]; ondorioz, behaketa berriak antzeman eta kontzeptu berriak sortu dira [5-8]. *Rifting*-prozesuaren baitan gertatzen den lurrazal kontinentalaren muturreko luzapena da hiperestentsioa. Aurrez luzatutako eta meheturiko lurrazal kontinentalak luzatzen jarraitzen du fase honetan, *detachment* faila-sistema baten bitartez. Subhorizontalak izatera hel daitezkeen angelu txikiko faila normal horiek lurrazal kontinental hauskor osoa zeharkatzen dute, eta mantuko arroak itsas hondoa azaleratzera iristen dira [9, 10]. Esfortzu estentsionalek aurrera jarraituz gero, kontinente-litosferaren apurketa gerta daiteke, eta lurrazal ozeaniko berria eratuko duen proto-gandor ozeaniko bat sortu.

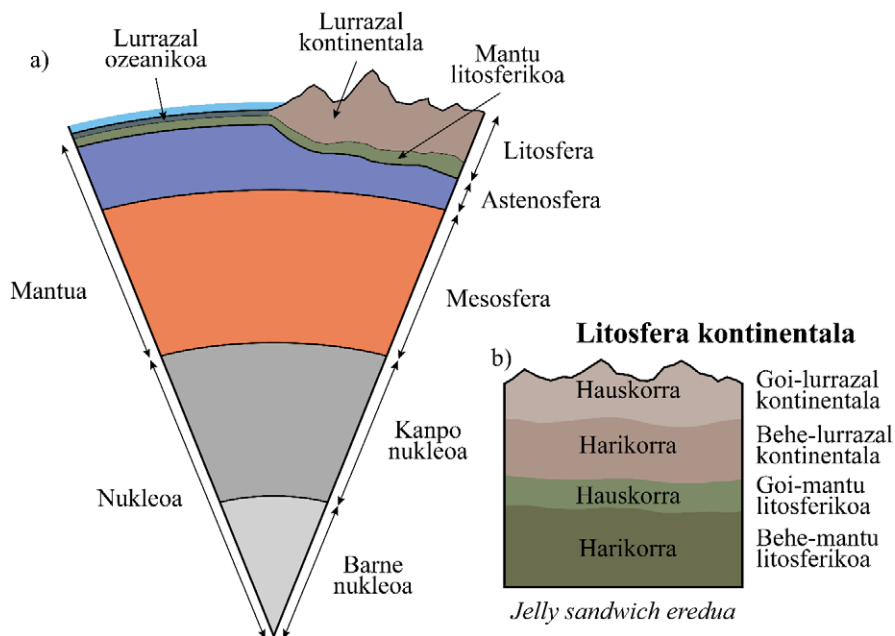
Gauzak horrela, hiperestentsioa eta horri lotutako fenomenoak munduko hamaika tokitan ari dira aztertzen. Esaterako, ideia hori funtsezko bilakatu da Ozeano Atlantikoaren irekiera nolakoa izan zen ulertzeko. Atlantikoko zenbait ertz egonkor konjugatuen kasua da; Iberia-Ternua, Angola-Brasil edota Norvegia-Groenlandia, esaterako [7, 11, 12]. Australia-Antartika sisteman edota Txina hego-ekialdeko itsasokoan ere antzeman dira hiperestentsioaren zantzuak [13, 14]; iraganean rift-arroak izan

ziren, baina inbertsio tektonikoaren bitartez gaur egun gerriko orogenikoen parte diren Pirinioak eta Alpeak ere eredu honen bidez hasi dira interpreta-tzen [1, 15-18].

Eta nola ez, iraultza horrek badu zeresana Euskokantauriar arroan (EKA) ere. Arro horretako Mesozoiko garaiko geologia xehetasun han-diz aztertu da urteetan zehar. Aurkikuntza horiek barneratzen dituen ebo-luzio geologikoaren historia eraikitzea, ordea, ez da inoiz zeregin makala izan [19], eta, antzemandako Kretazeoko estentsioaren fenomeno eta fak-tore garaikide guztiak barneratzen dituen teoria ez da aho batez onartu, oraindik. Jada, bada hiperestentsioari tokia egin dion autorerik ere [20-24], eta, agian, ideia horrek azal ditzake EKAn erregistratutako garai horretako prozesu eta fenomeno geologikoak.

2. LITOSFERA KONTINENTALA, ERREOLOGIAREN IKUSPUNTUTIK

Riftinga ulertzeko litosfera kontinentalaren egitura ezagutu behar da lehenik (1a. irudia). Litosferaren egituraketak eta horrek deformazioa-ren menpean emandako erantzunak berebiziko garrantzia dute rift-arro baten sorreran eta bilakaeran. Historikoki hainbat eredu plazaratu dira litosferak duen portaera erreologikoa deskribatzeko, baina, gaur egun, *jelly sandwich* gisa ezagutzen dena da, oro har, eredu onartuena [25-27] (1b. irudia). Eredu horretan, zurrinak eta hauskorrak diren bi eremu be-reizten dira, eta plastikoagoak eta moldakorrak diren beste bi eremu-rekin txandakatzen. Eremu zurrin horiek dira kontinente-lurrazalaren goiko aldea eta mantu litosferikoaren goiko zatia; plastikoagoak dira, berriz, kontinente-lurrazalaren beheko aldea eta mantu litosferikoaren beheko zatia. Ikusi denez, deformazioaren aurrean, portaera mekaniko desberdinak bereizten dira unitate bakoitzak dituen propietate fisiko, ki-miko eta mineralogikoengatik. Erreologiaz gain, kontuan hartu behar da litosfera kontinentalaren lodiera eta izaera heterogeneoa ere. Kontinente-litosferaren lodiera oso aldakorra da; 100 eta 350 km bitartekoa dela ba-lioesten da. Eta, era berean, kontinente-lurrazalarena ere 20 eta 70 km bitartekoa izan daiteke. Hori guztia kontuan izanda, esan daiteke lito-sfera kontinental barneratzen duten plaka guztiak ez dutela berdin joka-tzen esfortzuen menpean, eta horrek zeharo eragin dezake kontinente-litosferaren apurketan.



1. irudia. a) Lurraren egituraren irudi eskematikoa (eskala gabeko irudia), komposizioan (ezkerrean) eta erreologian (eskuinean) oinarrituta; b) litosfera kontinentalaren banaketa, erreologiaren ikuspuntutik, *jelly sandwich* ereduaren oinarritua.

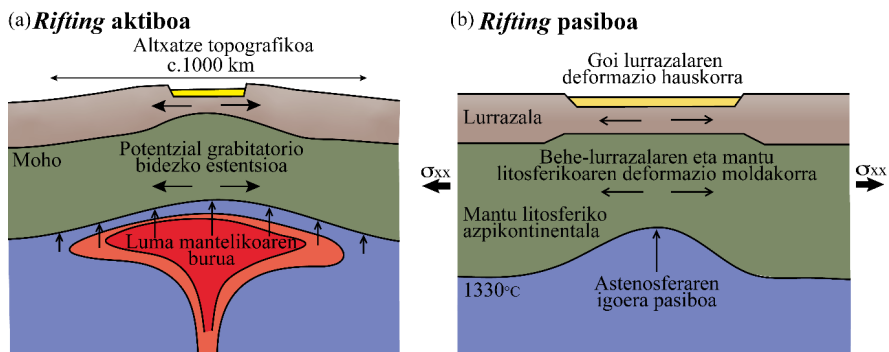
3. RIFTINGA ETA HIPERESTENTTSIOA

3.1. *Rifting*-prozesuaren sorrera

*Rifting*ak litosfera kontinentalaren luzatze, mehetze eta azkeneko apurketa bitarteko prozesu guztiak barneratzen ditu. *Rifting*a litosfera kontinentalaren eskualde-eskalako esfortzuekiko erantzun pasiboa da, eta esfortzu horien jatorria ezberdina izan daiteke. Izan ere, bereizi egiten dira sorrera aktiboa edo termikoki aktibatutakoa eta sorrera pasiboa (2. irudia).

Rifting aktiboan, mantuan zehar gora doan luma gorakorrek litosfera zurrunaren kontra jotzean eragiten ditu estentsio-indarrak. Dinamika horrek mantu astenosferikoaren gorakada eta litosferaren konkortzea eragiten ditu, eta, ondoren, zartatu egiten da. *Rifting* pasiboan, aldiz, plakek eragindako urruneko indar orokorrek (*far field forces*) eragiten dute litosfera kontinentalean estentsioa; lehendabizi lurrazala zartatzen dute, eta, ondoren, mantu astenosferikoaren gorakada eragin. Horrela, *rifting* aktiboan prozesu bolkanikoak hasiera-hasieratik gertatzen dira, azaleko arro sedimentarioa garatu aurretik; *rifting* pasiboan, berriz, prozesu bolkanikoak azaleko arro

sedimentarioa sortu ondoren gertatzen dira. Hala eta guztiz ere, bi eredu horiek muturreko eredu idealak dira, eta, seguruenik, bitarteko prozesu guztiak ere gerta daitezke. Gainera, oso garrantzitsua da kontuan izatea iraganeko egitura geologiko nagusiek etorkizuneko prozesuak baldintzatu ditzaketela [28], oso ohikoa baita deformazioa gune konkretu horietan kontzentratzea. Gune horiek, askotan, ahultasun-eremu gisa jokatzen dute; deformatzerako garaian, gainera, errazagoa da aurretik ahuldutako eremu batetik hastea, propietate fisikoen aldetik homogeneousagoa den beste batetik hastea baino. Horretaz gain, denbora da beste faktore garrantzitsuenetakoa bat. Izan ere, denboran zeharreko esfortzuen irauteak zeharo baldintzatzen du eskualde-eskalako deformazioaren bilakaera oro.



2. irudia. a) *Rifting* aktiboa eta b) *rifting* pasiboa. [25]etik moldatua.

3.2. Magman txiroak eta aberatsak diren kontinente-ertzak

Plaken tektonikaren ikuspuntutik aktiboak ez diren kontinente-lurrazalaren eta lurrazal ozeanikoaren trantsizio-guneak dira ertz egonkorak. Kontinente-ozeano trantsizioak ehunka kilometro luze izan ditzake, eta bertan zenbait eremu edo domeinu bereizten dira (3. irudia): hurbileko domeinua, *necking* domeinua, urruneko domeinua eta kanpoko domeinua. Oro har, ertzak bi multzotan sailkatu izan dira azken 30 urteetan, kausa genetikoaren eta zenbait faktore bereizgarriaren arabera [3, 29]: magman txiroak eta magman aberatsak diren ertzak.

Magman aberatsak diren ertzak edo ertz bolkanikoek, izenak dioten bezalaxe, magma-hornidura erlatibo handia izaten dute kontinenteen apurketa gertatzen denean. SDR (*Seaward dipping reflectors*) deritzen bolumen handiko pilaketa magmatikoak dira ertz mota horren ezaugarri nagusia (3. irudia). Gainera, apurketa hori airepean gertatzen da. Horretaz gain, *necking* domeinua erlatiboki estua izan ohi da, eta Moho etenunearen sismika bidezko identifikazioa nahiko erraza da sistema osoan zehar. Horrek guztiak,

3.3. Hiperluzaturiko kontinente-ertzen arkitektura

Ozeano Atlantikoaren bi ertzetan eginiko zenbait behaketetan, elkarren artean konparagarriak diren elementu eta eremu estruktural bereizgarriak deskribatu dira [7]. Ertz egonkor horietan, lehenago aipatu bezala, kostaldetik hasi eta lurrazal ozeanikoa hedatzen hasten den tokiraino zenbait domeinu bereizi dira, eta bakoitzak berariazko ezaugarri estrukturalak ditu. Eremu horiek dira aurrez aipaturiko hurbileko domeinua, *necking* domeinua, urruneko domeinua eta kanpoko domeinua (4. irudia). Ezaugarri horiek domeinu horien arkitektura zein rift-sistemen iraganeko eboluzioa interpretatzea ahalbidetzen dute. Domeinu horien arteko mugak trantsiziozkoak dira, eta, sarri, ez da erraza ertz egonkor berean domeinu guztiak identifikatzea. Domeinu bakoitza deformazioaren prozesu eta fase ezberdinen ondorio dela uste da. Hala eta guztiz ere, prozesu desberdinen aldibereotasuna edota gainjartzea ere gerta daiteke denboran eta espazioan zehar. Horren ondorioz, hainbat elementu gainezarririk egon daitezke, eta zaila da zenbait prozesu ulertzea.

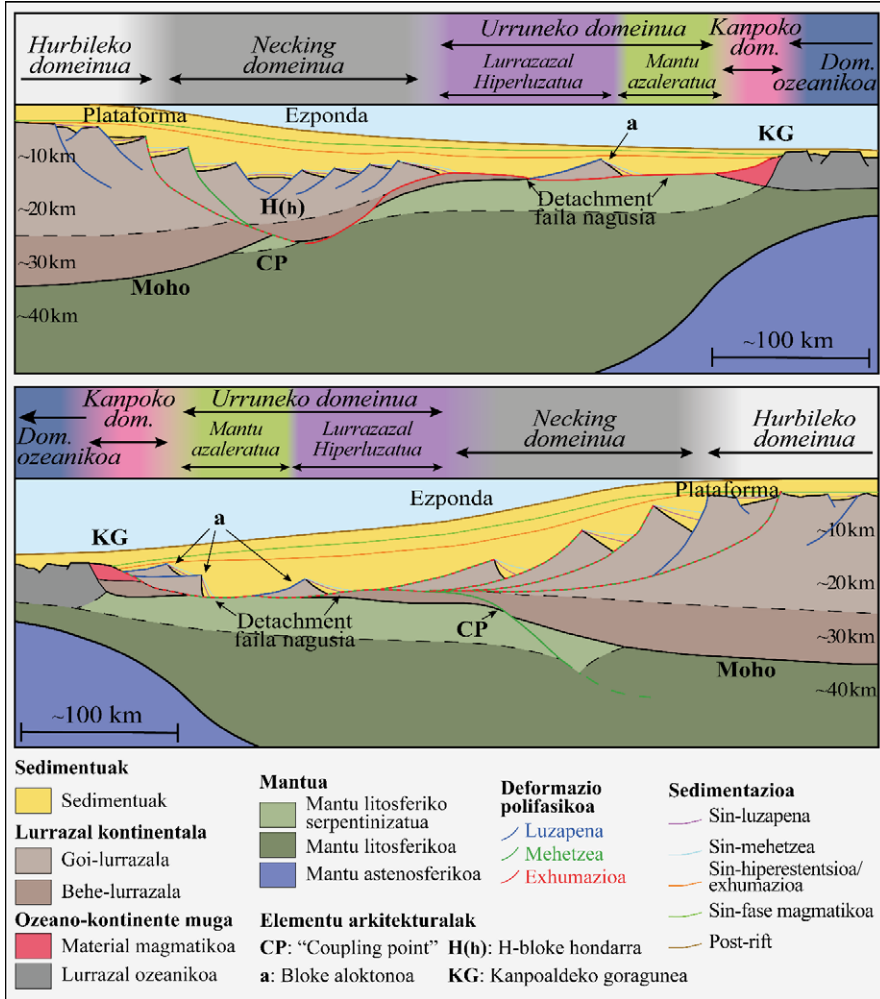
3.3.1. Hurbileko domeinua

Hurbileko domeinua kontinenteen plataformetara mugatzen da orokorrean, nahiz eta kontinenteen barrenerago ere heda daitekeen (Eskandinaviako mendigunea Norvegiako ertzean, adibidez). Estentsioaren eragina ertaina da, luzapen-faktorea (luzapena pairatutako gorputz baten lodierak izandako aldaketa definitzen duen faktorea; adibidez, faktore hori 2koa bada, estentsioaren ondoriozko gorputzaren lodiera jatorrizkoaren erdia izango da) 2z azpikoa eta lurrazalaren lodiera 25-30 km ingurukoa. Domeinu honen egitura bereizgarriak dira lurrazalaren erdialdean, portaera hauskorren eta moldakorren arteko mugaren inguruan, sustraitzen diren faila normalek mugaturiko goi-lurrazaleko graben eta erdi-graben egiturak (4. eta 5a. irudiak). Failak aktiboak diren bitartean, egitura-zoko horiek sedimentuz bete ohi dira (metakin sintektonikoak), falka-itxurako gorputz sedimentarioak eratuz.

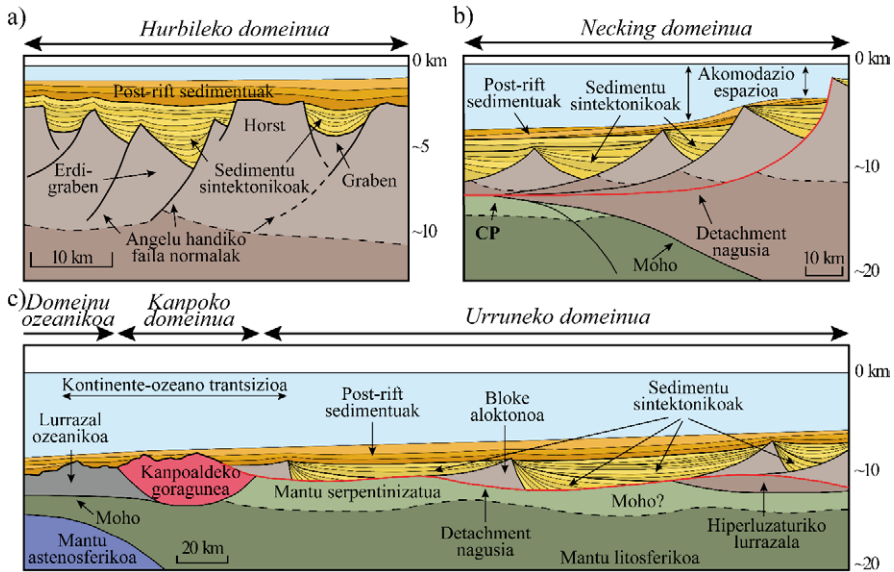
3.3.2. *Necking* domeinua

Eremu honetan, lurrazalak erakusten duen mehetzeari egiten dio erreferentzia *necking* terminoak (5b. irudia). Hurbileko eta urruneko domeinuen arteko trantsiziozko horretan, lurrazalaren lodiera 25-30 km-koa izatetik 10 km baino txikiagoa izatera pasatzen da. Diferentzia hori behe-lurrazalaren deformazio moldakorren ondorio da, batik bat, behe-lurrazala erabat mehetzeraino deformatua izaten baita. Lurrazalaren bat-bateko mehetze horri lotzen zaio Moho etenuneak erakusten duen geometria. Bestalde, akomodazio-espazioa nabarmen hazten da arro erdirantz [35]. *Necking* domeinuaren kanpoko aldean, *taper break* bezala ezagutzen den estugunea

definitzen da [37]. Puntu hori lurrazala 10 km lodi den eta kostatik hurbilen dagoen gunea da. Lodiera horrekin, kontinente-lurrazal osoak portaera hauskorra izaten du, eta, horrela, hausturek lurrazal osoa zeharkatu eta mantuan eragiterainoko gaitasuna lortzen dute. Failek ozeanoranzko noranzkoan aurrenezko lurrazala zeharo zeharkatzen duten gune hori *coupling point* gisa ezagutzen da [37] (5b. irudia).



4. irudia. Hiperluzaturiko rift-ertz konjugatu baten zehar-ebaki eskematikoa. [15] lanean oinarritua eta moldatua.



5. irudia. Hiperluzaturiko ertz egonkor baten domeinuen irudi eskematikoak: a) Hurbileko domeinua, b) Necking domeinua eta c) Urruneko eta kanpoko domeinuak. [7] lanean oinarritua eta moldatua.

3.3.3. Urruneko domeinua

Gutxien ezagutzen den domeinua da honako hau. Askotan, *hiperluzaturiko domeinu* terminoa erabiltzen da muturreraino luzatu eta mehetutako lurrazal kontinentalak deskribatzeko. Domeinu horrek kontinente- eta ozeano-lurrazalaren arteko transizioa barneratzen du, eta eskala ezberdinetakoa izan daiteke. Lurrazal kontinentalak 10 km baino meheagoak da, eta horren beheko muga S [38, 39] edo H [40] deritzon islapen sismiko zorrotz baten bitartez definitutako *detachment* faila subhorizontal irregular bati dagokio (5c. irudia). Faila hori kontinente-lurrazal zatikatuaren eta neurri batean serpentinizatutako mantuaren arteko mugatzat interpretatzen da. Serpentinizazioa fluidoaren zirkulazioaren bitartez mantuko arrokek garatzen duten alterazioa da; prozesu horren ondorioz, ura, askotan itsasoko uraren infiltrazioaren bitartez, mineralen kristal-egituran sartzen da, eta mineral sekundarioek (serpentina) jatorrizkoak (olibinoak, anfibolak eta piroxenak) ordezkatzeko dituzte, *serpentinita* deituriko arroka metamorfikoak garatuz. Ereku hori goi-lurrazal zatikatuak, mantuko peridotita serpentinizatuek eta magmatismoaren ondoriozko intrusioek osatzen dutela uste da. Ereku horren ezaugarri nagusia da lurrazal plastikoaren hondarrik ez egotea [7]. Kontinente-lurrazalaren geometria ere aldakorra izaten da. Ikuspegi estruktural ba-

tean oinarrituta, hainbat gorputz edo bloke identifika daitezke. Domeinu horren eta aurrekoaren ezaugarri dira H-blokeak [2] eta bloke aloktonoak [11] (4. irudia). Bloke horien jatorria *riftingaren* garapenaren arabera da, eta bloke bakoitza prozesuaren une bati eta deformazio modu bati loturik dago. Bukatzeko, garrantzitsua da betekin sedimentarioaz hitz egitea ere. Hainbat kilometrotako lodiera izatera hel daiteke, eremu hori baita estentsio handiena jasan duen eremua. Eta hori gutxi balitz, prozesu hidrotermalek eragin handia izan dezakete sedimentu horien diagenesian, eta hainbat metalen iturri diren mineralizazioak sor ditzakete [41-44].

3.3.4. *Kanpoko domeinua*

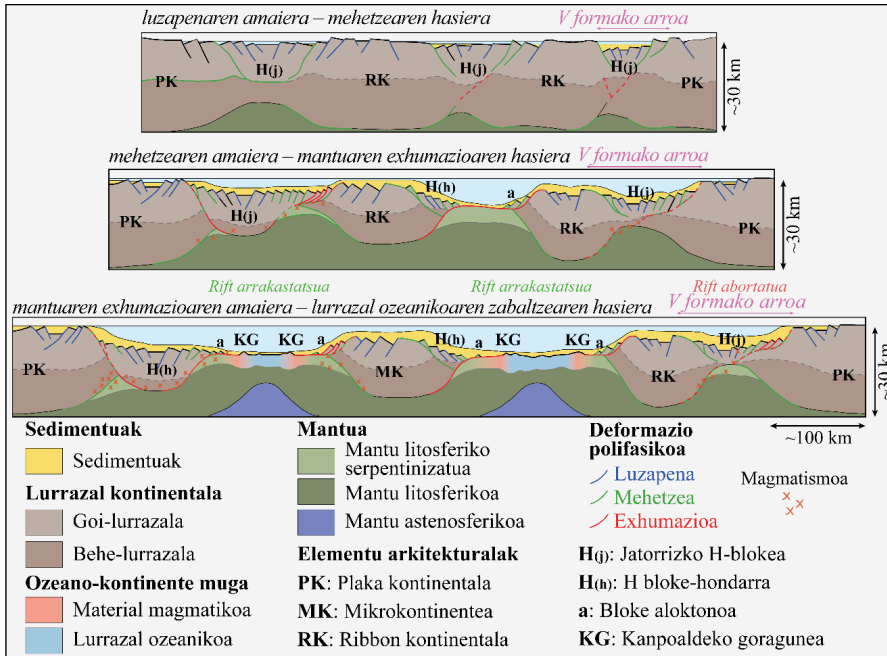
Aurreko domeinuaren antzera, honako hau ere oso gutxi ezagutzen da. Material bolkanikoz eta sedimentuz osaturiko domeinu honek kontinente-lurrazal hiperluzatua eta hastapeneko lurrazal ozeanikoa banatzen ditu, datu sismikoen interpretazioaren arabera (5c. irudia). Magman txiroa edo aberatsa den ertz egonkorraren izaeraren arabera, terminologia desberdina erabili izan da domeinu hau deskribatzeko garaian. Ingurune bolkanikoe-tan, *ertzeko goragune* deritzo, eta apurketa kontinentalaren ezaugarri den sekuentzia magmatikoaren parte da [45]. Magman txiroak diren ertzetan, aldiz, *kanpoaldeko goragune* terminoa erabiltzen da [46]. Ertz horien arteko diferentzia nagusietako bat magmaren hornidura da. Magman aberatsak diren ertzetan, lurrazal kontinentalaren eta ozeanikoaren arteko ukipen zorrotzak definitzen du apurketa kontinental. Magman txiroak diren ertzetan, aldiz, ukipen hori askoz ere lausoagoa da, eta gradualagoa da lurrazal ozeaniko-kontinentalaren trantsizioa. Domeinu horretako kontinente-lurrazalaren konposizioak ezezaguna izaten jarraitzen du kasu gehienetan, antzeko egituretan ez baita nahikoa zundaketa egin. Eta hori gutxi balitz, domeinu honetaraino heda daitezke material diapirikoen pilaketa halozinetikoak, sismika bidezko irudi garbiak lortzea galarazten dutelarik (Atlantiko hegoaldean, esaterako [47]).

3.3.5. *Domeinu ozeanikoa*

Domeinu honen izaera nahiko ondo definitzen da magman txiroak edo aberatsak diren ertzen arabera parametro geofisikoen arabera, nahiz eta hemen ere urriak diren zundaketak [7]. Parametro geofisiko horiek dira uhin primarioen abiaduren homogeneotasuna, anomalia magnetikoen antolaketa eta islapen gutxi izatea. Kasuak kasu, gandor ozeanikoen bidez hedatzen den jatorri igneoko lurrazal ozeanikoaren domeinua da hau, eta nabarmen lodiagoa da magman aberatsak diren ertzetan txiroak direnetan baino.

3.4. Rifting-eremuetako kontinente-lurrazaleko blokeak

Aipatu bezala, ikuspegi estruktural batetik behatuta, geometria eta jatorri ezberdineko blokeak antzeman daitezke kontinente-ertzetan. Horien deskribapen estrukturalen eta interpretazio genetikoan eginiko sailkapena ikusten da 6. irudian eta 1. taulan [11]. Bloke horien sorreraren interpretazioa behar-beharrezkoa da riftingaren bilakaera eta horrek barneratzen dituen prozesuak ulertu eta deskribatzeko. Rifting-prozesuan garatzen diren graben egituretatik, normalean, egitura guztiak ez dira arrakastatsuak izaten. Egitura batzuk bertan behera geratzen dira. Hau da, egitura horietan lurrazala ez da guztiz banatzera iristen. Sakonune horiek V formako arro gisa ezagutzen dira. Arro horiek *necking* domeinuen antzekoak dira, eta Iberia-Ternua ertz konjugatuko sisteman ikus daitezke, Galiziako ertzaren barnealdean, adibidez [10].



6. irudia. Rifting-prozesuan bereizten diren bloke kontinentalen eredu eskematikoa. [11] lanetik hartua eta moldatua.

1. taula. *Rifting* prozesuan bereizten diren zenbait egitura kontinentalen deskribapen eta ezaugarri nagusiak. [11]lanetik hartua eta moldatua.

Bloke mota	Ezaugarriak	Adibide-tipoa	Blokeari loturiko deformazio fasea
Mirokontinentea	Lurrazal ozeanikoz inguratutako 15 km baino lodiagoko lurrazal kontinentalak.	<i>Jan Mayen</i>	Luzapen eta mehetze faseei eta batez ere luma manteliko baten magmatismoari lotua
Ribbon kontinentalak	Kontinenteari loturiko 20 km baino lodiagoko lurrazal kontinentalak.	<i>Flemish Lurmuturra, Galiziako Bankua, Rockall Bankua</i>	Luzapen eta mehetze faseei lotua
H-blokea	Kontinenteari loturiko eta detachment failek mugaturiko 15-20 km baino lodiagoko lurrazal kontinentalak.	<i>Ternuako ertz egonkorreko necking domeinua, Alpeetako E-Briançonnais</i>	Mehetze eta exhumazio faseei lotua
Bloke estentsional aloktonoa	Detachment faila gaineko 5 km baino lodiagoko lurrazal kontinentalak.	<i>Iberia mendebaldeko ertz egonkorreko domeinu hiperluzatua, Alpeetako Piz Laviner</i>	Exhumazio faseari lotua
Kanpoaldeko goragunea	Domeinu ozeanikoaren eta distalaren arteko material bolkanikoz eta sedimentuez osaturiko trantsizio gunea.	<i>Ternuako ertz egonkorreko kanpokoa gunea</i>	Kontinente-apurketari eta ozeanoa zabaltzeari lotua

3.5. *Rifting* pasiboa: luzapena, mehetzea, mantuaren exhumazioa eta hondo ozeanikoaren zabaltzea

Rifting pasiboa eta kontinenteen apurketa lau fase jarraituetan banatzen dituzte ikerlariek, Iberiako eta Ternuako ertz egonkor konjugatuetan oinarriturik, besteak beste [7, 10]. Fase horiek litosfera kontinentalaren luzapena, mehetzea, mantuaren exhumazioa eta lurrazal ozeaniko berriaren zabaltzea dira, hurrenez hurren. Esan daiteke litosfera kontinentalaren deformazio moduari loturiko estentsioaren migrazioaren eta estentsio horren lekutzearen ondorioa dela *riftinga*. Hala eta guztiz ere, fase horien sekuentzia osoa ez da beti bere osotasunean garatzen, eta, kasu batzuetan, bertan behera gera daiteke *riftingaren* garapena. Luzapen-faktorearen eta deformazio estentsionalaren ratioaren arabera (deformazioaren iraupena eta intentsitatea), arto ezberdinak sailkatu dira munduan zehar. Arto horiek *rifting* pasiboaren garapenaren une ezberdinetako argazkiak direla jo daiteke. Horien artean bereiz daitezke, esaterako, sag motako subsidentzia termaleko artoak (Ipar Ameriketako Michigan eta Illinois artoak), rift kontinentalak (Rhine grabena), abortatutako riftak (Ipar Itsasoa), ildo proto-ozeanikoak (Itsaso Gorria) eta ertz pasiboak (Ozeano Atlantikoko ertz egonkorak), bilakaera horren estaien baitan [25].

3.5.1. Luzapena

Hurbileko domeinuan deskribaturiko angelu handiko faila normal listrikoek sorturiko horst eta graben zein erdi-graben egituren bitartez garatzen

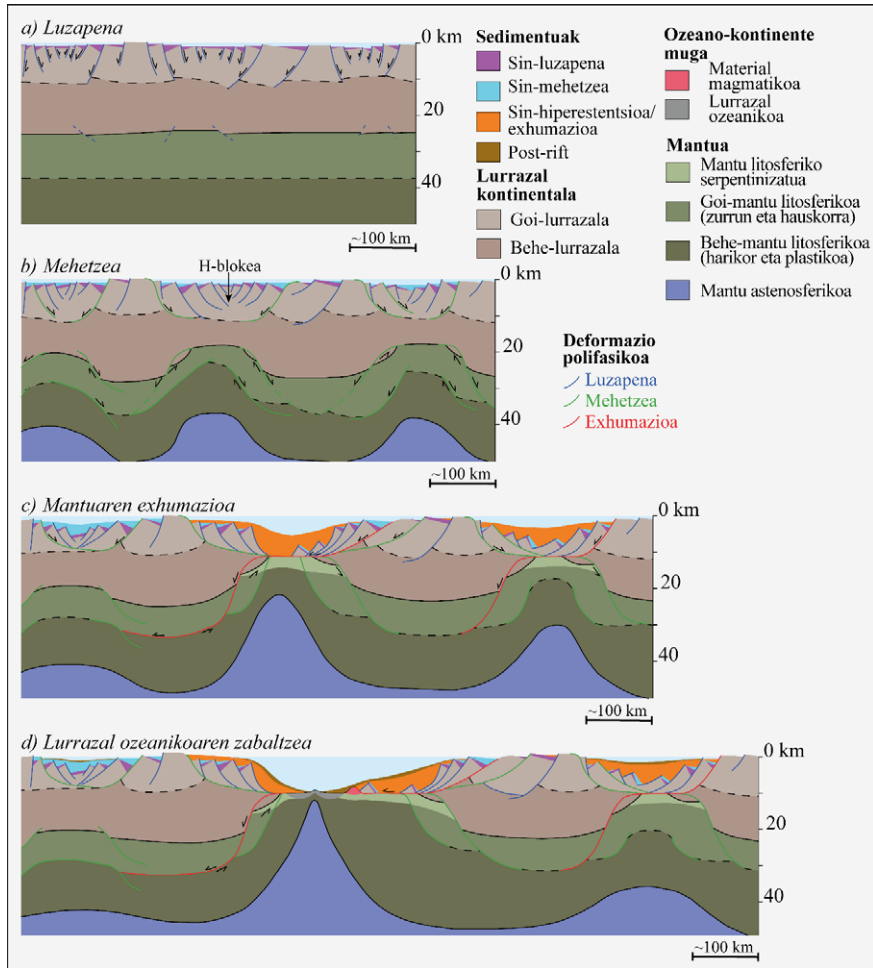
den subsidentzia tektonikoak bereizten du luzapen fase hau. Faila normal horiek lurrazal kontinentalaren goiko aldeko lurrazal zurrunean zein mantuaren goiko aldean eragiten duten zizaila-eremuak dira (7a. irudia). Erliebean al-daketak sortzearen ondorioz, failei loturiko arro sedimentarioak modu orokorrean eta independentean garatzen dira lurrazalean. Behe-lurrazalak duen portaera erreologikoa, ordea, plastikoagoa da, eta geruza hori argaltzearen ondorioz gertatzen da deformazioa.

3.5.2. Mehetzea

Estentsio-egoerak aurrera jarraitzen badu, deformazioa gunee zehatzetara mugatzen hasten da, *necking* domeinuan antzeman daitekeen bezala. Angelu handiko faila listrikoak garazetik, behe-lurrazaleko eta mantuko arroak goratzen dituzten eta etzanagoak diren *detachment* faila sistema konjugatuak sortzen dira (7b. irudia). Faila horien gaineko blokea lehen definituriko H-blokea izaten da [11]. Era berean, faila listrikoek sedimentazioa kontrolatzen jarraitzen dute; gainera, subsidentzia tektonikoaz gain, mantuaren goratzearen ondoriozko subsidentzia termikoa ere garrantzitsua izaten da, eta, horren ondorioz, gradiente geotermikoa handitu egiten da. Fase horren beste ezaugarrietako bat da behe-lurrazala eta goi-mantua banandu egin daitezkeela zizaila-eremuen egokitzeagatik.

3.5.3. Mantuaren exhumazioa

Lurrazal kontinentalaren zatiketa aurrera doan heinean, *detachment* failak goitik behera zeharkatzen dute ahuldutako lurrazala. Lurrazalak 10-12 km-ko lodiera duenean, hauskor-moldakor muga mantuan kokatzen da, eta, ondorioz, lurrazal osoa zeharka dezaketen *detachment* failak gara daitezke, mantuaren azaleratzea ahalbidetuz. Horrekin lotuta, prozesu hidrotermalen ondorioz serpentinizatu den mantuko arroak itsaso hondora azaleratu daitezke, edo arro sedimentarioen azpian lekutu [22] (7c. irudia). Fase hori urruneko eta kanpoko domeinuetako giltzarrien analisiaren bidez interpretatzen da. Hiperestentsioa gertatzen dela esaten da baldin lurrazal kontinentalak azkeneraino luzatzen eta mehetzen bada. Horren ondorioz, subsidentzia handieneko gunea *detachment* faila subhorizontalaren gainean kokatzen da, eta bertara mugatzen da sedimentazio gehiena. *Detachment* failaren gainean, H-blokea eta horren hondarrak diren *necking* domeinuko bloke aloktono baskulatuak desplazatzen dira [11]. Bestalde, gertakari magmatiko eta bolkanikoak arruntak izaten dira, neurri batean behintzat, eta, gradiente geotermikoa 80°C/km izatera hel daiteke [48]. Gainera, mantutik datozen fluidoak itsasora azaleratzen dira, uraren kimismoa (pH-a eta mantuko ezohiko elementuen aberastasuna, besteak beste) alda daiteke, eta horrek eragina izan dezake ingurune-ko ekosistemetan, sedimentazioan eta diagenesian [41].



7. irudia. Deformazio polifasikoa barneratzen duen rifting-pasibo prozesuaren bilakaera eskematikoa (magan txiroak diren ertz-egonkorretarako eredu): a) Luzapena, b) Mehetzea, c) Mantuaren exhumazioa eta d) Lurrazal ozeanikoaren zabaltzea. [7, 11] lanetan oinarritua eta moldatua.

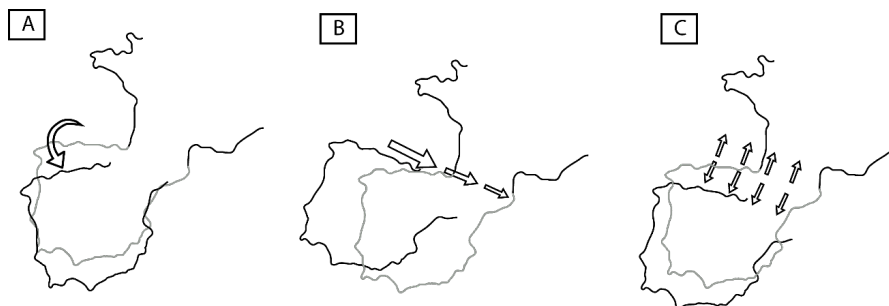
3.5.4. Lurrazal ozeanikoa zabaltzea

Mantua itsaspara exhumatu denean, prozesu termal eta mekanikoak eremu estu batean lekutzen dira, urruneko domeinuan eta ozeanikoan hain zuzen. Mantu astenosferikoaren goratzearen ondoriozko deskompresioa eta urtzea gertatzen da. Momentu horretan, plaka litosferikoa bakarra zena bitan hausten da, eta lurrazal ozeaniko berria sortzen hasten da,

zeina ildo proto-ozeaniko baten hastapena baita. Kontinenteen apurketak bere bidea jarraitzen du, eta eremu kontinentalen ertzek subsidentzia edo hondoratzeko termala pairatzen dute (7d. irudia).

4. HIPERESTENTSIOA EUSKOKANTAURIAR ARROAN

Sarreran esan bezalaxe, Mesozoikoan irekitzen hasi zen Bizkaiko golkoaren bilakaera oso gai eztabaidatua da. Izan ere, irekitze horren ondorioz sortu zen EKA, Iberia eta Eurasia plaken mugako beste zenbait arroren antzera. Baina, aipatu bezala, irekitze horren bilakaerari buruzko proposamenak ez dira gutxi. Oro har, hiru eredu bereizten dira (8. irudia). Lehenengoa, Iberiar plakak Eurasiarekiko erlojuaren kontrako noranzkoan eginiko 35° inguruko errotazioarena, «guraize irekiera» gisa deskribaturikoa [49]; bigarrena, Iberia eta Eurasia banatzen zituen urratze-faila senestro (ezker-alboranzko mugimendua duen faila) baten menpean jazotakoa [50]; eta hirugarrena, segmentuetan banaturiko hiperestentsioaren menpeko *riftingari* buruzkoa [20, 21]. Bereziki, gaur egun, azken ideia horren baitan ari da komunitate zientifikoa ikerketa garatzen, eta, dagoneko, emaitza eta interpretazio solidoak eskaintzen ditu.

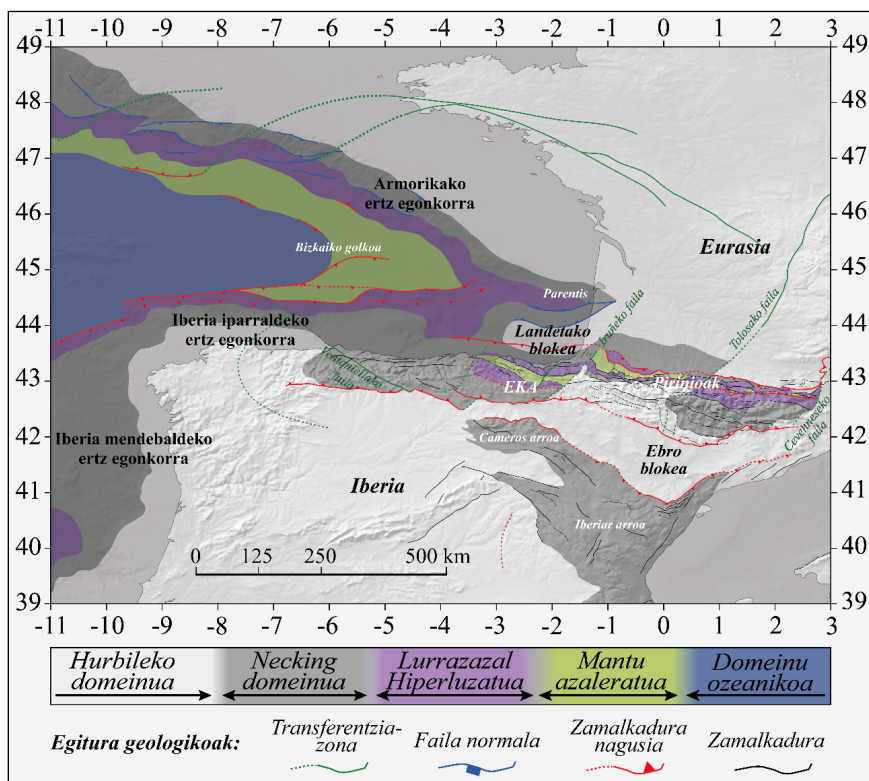


8. irudia. Iberiar plakaren eta Eurasiaren arteko erlazio zinematikoen hiru ereduak: a) guraize-irekiera, b) urratze-faila senestroaren menpekoea eta c) hiperestentsioarena. [51] lanetik hartua.

4.1. EKAKo datuak riftaren inguruan

Orokorrean, EKAKo sorrera azaltzeko Iberia eta Eurasia plaka kontinental nagusien arteko erlazio zinematikoei buruz hitz egiten da. Baina eskala txikiagoko elementuak definitzea garrantzitsua da kasu honetan. Jurasikoaren amaieran eta Kretazeoan zehar Iberia eta Eurasia plaka nagusien arteko bloke kontinental txikiagoek (adib. Ebro eta Landetako blokeak) osatzen zuten rift-sistema konplexu baten parte zen EKA [52]. Rift-sis-

tema horrek (Pirinioak, Bizkaiko golkoa - Parentis, EKA eta Iberiar sistema) bloke eta plakak mugatzen zituen [20], plaka eta ribbon kontinentalen puzzle tektoniko bat osatuz [21, 53]. Konfigurazio tektoniko horretan rift-ertzetan identifikaturiko domeinuak ere bereizten dira (9. irudia), lurrazal kontinentalaren lodiera heterogeneoa azpimarratuz. Sistema horren parte ziren riftek bilakaera diakronikoa izan zuten, eta rift horiek ere segmentutan banatuta zeuden (Pirinioak, esaterako). Beraz, bilakaera ezberdineko hainbat rift-arro garatu ziren garai horretan, Kretazeo berantiarrean konpresioa hasi zen arte.



9. irudia. Hiperluzaturiko ertzetan identifikaturiko domeinuen kokapena, Bizkaiko golkoa, Parentis, EKA eta Pirinioak barneratzen dituen Mesozoiko garaiko rift-sisteman. [21] lanetik hartua eta moldatua.

Hiperestentsioaren ezaugarrietako bat mantuaren exhumazioa dela aipatu da. Pirinioetan hainbat tokitan topatu dira itsaspean birlandutako mantuko lherzolitak (arroka igneo ultramafikoak) [54]. Mantuko arroka horiek EKAKo ekialdeko azaleramenduetan ere aurkitu dira, Leitzako failari lotu-

riko Albiar-Cenomaniar garaiko tenperatura altuko metamorfismoa erakusten duen marmol-banda bati atxikirik, hain zuzen ere [22, 55]. Aipaturiko azaleramendu horietako laginen analisi petrologiko eta geokimikoek adierazten dute ~200-230°C-ko tenperatura zuten fluido gazi hidrotermalen jarduera izan zela garai hartan, gradiente geotermiko oso goratu baten seinale. Gune horretaz gain, arroan zehar ere topatu dira garaikide diren failei loturiko produktu hidrotermal eta diagenetiko gehiago ere [56-58].

Era berean, Leitza failaren hegoaldean kokatzen den Mesozoikoko sedimentuez osaturik dagoen Ultzamako azpiarroko (*Nappe des Marbres* [59]) unitatean eginiko ikerketetan ere topatu dira hiperestentsioarekin bat datozen deformazioren zantzuak [24]. Horretaz gain, ikerketa horretako paleo-tenperatura azterketek 550°C-ko muga gaintitu zela iradokitzen dute, eta tenperatura altuari loturiko gertakari metamorfikoak *riftingaren* garaikide direla interpretatzen da. Bestalde, estentsio goiztiarrari loturiko diapirismoak ere garrantzia du testuinguru geologiko horretan. Estentsioaren ondoriozko faila normalen aktibazioak Triasikoan metatutako gatz eta buztinen mobilizazioa bultzatu zuen, gatz tektonikaren bitartez antiklinalak garatuz [24, 60] eta sedimentazioa baldintzatuz.

Gertakari bolkanikoei dagokienez, arroan bada Albiar-Santoniar bitartean jazotako jarduera bolkanikoen erregistroa ere [60]. Itsaspean gertatutako prozesu leherkorak [61-63], laba-koladak edota intrusio magmatikoak [64] ezagunak dira Euskal Arkuaren erdigunean [65]. Material bolkaniko horiek garai hartako itsaspeko sedimentuen artean topatzen dira, eta 2.500 m-ko segida bolkano-sedimentarioa osatzera hel daitezke Eibar, Elgoibar, Bergara, Zumarraga eta Azkoiti udalerrien artean [66].

4.2. Hiperestentsioa EKAn: datu zaharrak, eredu berriak

Mantuko arroken azaleramenduek, jarduera hidrotermalak, inguruneke beroak, bolkanismoak, irudi sismikoen interpretazioak eta beste hainbat datu EKAn estentsioa nolakoa izan zen jakitea ahalbidetzen dute [20-24]. Kretazeoko estentsioak lurrazala muturreraino luzatzea eta mehetzea ekarri zuen, *detachment* faila bidezko sistema konplexu baten bidez. Faila horiek mantuko arrokak azaleratzea eragin zuen zenbait tokitan, eta azaleratsetik gertu egon zen arroko beste hainbatetan [22]. Mantuak azaleratzearen ondoriozko alterazioak izan zituen (itsasoko uren infiltrazioaren ondoriozko serpentinizazioa, esaterako). Era berean, Mesozoikoko sedimentuak mantuko arroken gainean kokatu ziren, eta horiek ere fluido hidrotermalen jardueraren ondoriozko diagenesi goiztiarra (eta metamorfismoa) baldintzatu zuten askatzen zen beroarekin batera [24]. Horretaz gain, mantuaren igotzearen ondoriozko deskonpresioak magmaren sorrera bultzatu zuen. Magma horrek bilakaera estrusiboa eta fluidala zein intrusio bidezkoa izan zuen tokian-tokian, eta sedimentuen artean edota itsaspean lekutu zen. Es-

tentsio-egoera amaitu eta konpresio alpetarra hasi zenean, hiperestentsioan garaturiko egiturak berraktibatu ziren, eta EKAREN inbertsio tektonikoa baldintzatu zuten horiek.

Eredu hori garrantzitsua izan daiteke EKAREN eboluzioa ulertzeko, deskribaturiko fenomeno geologiko asko bertan sartzen baitira, eta bat dator inguruko eskualde geologikoen bilakaeren zenbait interpretaziorekin ere. Azken finean, geologia ulertzeko, behar-beharrezkoa da behaketekin eta urratsez urrats eraikitako ereduetan oinarritzea, eta eredu horiek ikerlarien ulermenaren eta teknologiaren arabera moldatzen dira. Horretarako, derri-gorrezkoa da geologoek arteko elkarlana modu malgu eta eraikitzaile batean bultzatzea, etor daitezkeen aldaketen aurrean eraginkorrak izaten eta datu zaharrekin eredu berriak eraikitzen laguntzeko.

5. ESKER ONAK

Lan honek Eusko Jaurlaritzako IT1029-16 ikertalde kontsolidatuaren, 2020.0113 UPV/EHU-TOTAL ikerketa-kontratuaren eta UPV/EHUko ikertzaileak prestatzeko PIF 19/149 bekaren babesa jaso du. Bestalde, esker onak helarazi nahi dizkiegu Fernando Sarrionandia editoreari, Arturo Apraizi eta zuzentzaile anonimoari, lan hau hobetzeko egindako zuzenketa eta aholkuengatik.

BIBLIOGRAFIA

- [1] MANATSCHAL, G. 2004. «New models for evolution of magma-poor rifted margins based on a review of data and concepts from West Iberia and the Alps». *Journal of Earth Science*, **93**, 432-466.
- [2] LAVIER, L.L. eta MANATSCHAL, G. 2006. «A mechanism to thin the continental lithosphere at magma-poor margins». *Nature*, **440**, 324-328.
- [3] DORÉ, T eta LUNDIN, E. 2015. «Hyperextended continental margins- Knowns and unknowns». *Geology*, **43**, 95-96.
- [4] PÉRON-PINVIDIC, G. eta MANATSCHAL G. 2019 «Rifted Margins: State of the Art and Future Challenges». *Frontiers in Earth Science*, **7**, 218.
- [5] RESTON, T.J. 2005. «Polyphase faulting during the development of the west Galicia rifted margin». *Earth and Planetary Science Letters*, **237**, 561-576.
- [6] RANERO, C.R. eta PÉREZ-GUSSINYÉ, M. 2010. «Sequential faulting explains the asymmetry and extension discrepancy of conjugate margins». *Nature*, **468**, 294-298.
- [7] PÉRON-PINVIDIC, G., MANATSCHAL, G. eta OSMUNDSEN P.T. 2013. «Structural comparison of archetypal Atlantic rifted margins: A review of observations and concepts». *Marine and Petroleum Geology*, **43**, 21-47.

- [8] CLERC, C., RINGENBACH, J.C., JOLIVET, L., eta BALLARD, J.F. 2018. «Rifted margins: Ductile deformation, boudinage, continentward-dipping normal faults and the role of the weak lower crust». *Gondwana Research*, **53**, 20-40.
- [9] MANATSCHAL, G., FROITZHEIM, N. RUBENACH, M., TURRIN, B.D. 2001. «The role of detachment faulting in the formation of an ocean-continent transition: insights from the Iberia Abyssal Plain». *Geological Society, Special publications*, **187**, 405-428.
- [10] MANATSCHAL, G., SUTRA, E., eta PÉRON-PINVIDIC, G. 2010. «The lesson from the Iberia-Newfoundland rifted margins: how applicable is it to other rifted margins?». *Central and North Atlantic Conjugate Margins Conference*, **2**, 27-37.
- [11] PÉRON-PINVIDIC, G. eta MANATSCHAL, G. 2010. «From microcontinents to extensional allochthons: witnesses of how continents rift and break apart?». *Petroleum Geoscience*, **16**, 189-197.
- [12] UNTERNEHR, P., PÉRON-PINVIDIC, P., MANATSCHAL, G., eta SUTRA, E. 2010. «Hyper-extended crust in the South Atlantic: in search of a model». *Petroleum Geoscience*, **16**, 207-215.
- [13] GILLARD, M., AUTIN, J. eta MANATSCHAL, G. 2016. «Fault systems at hyper-extended crust: Structural style, evolution and relation to magma». *Marine and Petroleum Geology*, **76**, 51-67.
- [14] NIRRENGARTEN, M., KUSZNIR, N.J., SAPIN, F., DESPINOIS, F., PUBELLIER, M., CHANG, S.P., LARSEN, H.C. eta RINGENBACH, J.C. 2020. «Extension modes and breakup processes of the southeast China-Northwest Palawan conjugate rifted margins». *Marine and Petroleum Geology*, **113**, 104-123.
- [15] JAMMES, S., LAVIER, L. eta MANATSCHAL, G. 2010. «Extreme crustal thinning in the Bay of Biscay and the Western Pyrenees: From observations to modeling». *Geochimistry, Geophysics, Geosystems*, **11**, 10.
- [16] LAGABRIELLE, Y. eta BODINIER, J.L. 2008. «Submarine reworking of exhumed subcontinental mantle rocks: field evidence from the Lherz peridotites, French Pyrenees». *Terra Nova*, **20**, 11-21.
- [17] RESTON, T. eta MANATSCHAL, G. 2011. «Rifted Margins: Building Blocks of Later Collision». BROWN, D. eta RYAN, P.D. (Edk). NON: *Arc-Continent Collision*, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 3-21.
- [18] RIBES, C., MANATSCHAL, G., GHIENNE, J.F., KARNER, G.D. JOHNSON, C.A., FIGUEREDO, P.H., INCERPI, N. eta EPIN, M.E. 2019. «The syn-rift stratigraphic record across a fossil hyper-extended rifted margin: the example of the northwestern Adriatic margin exposed in the Central Alps». *International Journal of Earth Sciences*, **108**, 2071-2095.
- [19] ROBLES, S. 2014. «Euskokanauriar arroko eboluzio geologikoa». Non: BODEGO, A., MENDIA, M., ARANBURU, A., eta APRAIZ, A. (Edk). *Euskokanauriar arroko geologia*. Euskal Herriko Unibertsitateko Argitalpen Zerbitzua, Bilbao, 9-104.

- [20] ROCA, E., MUÑOZ, J.A., FERRER, O. eta ELLOUZ, N. 2011. «The role of the Bay of Biscay Mesozoic extensional structure in the configuration of the Pyrenean orogen: Constraints from the MARCONI deep seismic reflection survey». *Tectonics*, **30**, 2.
- [21] TUGEND, T., MANATSCHAL, G., KUSZNIR, N.J., MASINI, E., MOHN, G. eta THINON, I. 2014. «Formation and deformation of hyperextended rift systems: Insights from rift domain mapping in the Bay of Biscay-Pyrenees». *Tectonics*, **33**, 1239-1276.
- [22] DEFELIPE, I., PEDREIRA, D., PULGAR, J.A., IRIARTE, E. eta MENDIA, M. 2017. «Mantle exhumation and metamorphism in the Basque-Cantabrian Basin (N Spain): Stable and clumped isotope analysis in carbonates and comparison with ophicalcites in the North-Pyrenean Zone (Urdach and Lherz)». *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **18** (2), 631-652.
- [23] DEFELIPE, I., PULGAR, J.A. eta PEDREIRA, D. 2018. «Crustal structure of the eastern Basque-Cantabrian zone – western Pyrenees: from the Cretaceous hyperextension to the Cenozoic inversion». *Revista de la Sociedad Geológica de España*, **31** (2), 69-82.
- [24] DUCOUX, M., JOLIVET, L., CALLOT, J.P., AUBOURG, C., MASINI, E., LAHFID, A. HOMONNAY, E., CAGNARD, F., GUMIAUX, C. eta BAUDIN, T. 2019. «The Nappe des Marbres Unit of the Basque-Cantabrian Basin: The Tectono-thermal Evolution of a Fossil Hyperextended Rift Basin». *Tectonics*, **38**, 3881-3915.
- [25] ALLEN, P. eta ALLEN, J.R. 2013. *Basin analysis: Principles and Application to Petroleum Play Assessment* (3. Edizioa). John Wiley & Sons, Oxford.
- [26] CHEN, W.P. eta MOLNAR, P. 1983. «Focal depths of intracontinental and intraplate earthquakes and their implications for the thermal and mechanical properties of the lithosphere». *Journal of Geophysical Research*, **88** (B5), 4183-4214.
- [27] JACKSON, J. 2002. «Strength of the continental lithosphere: Time to abandon the jelly sandwich?». *GSA Today*, **12**, 4-10.
- [28] BENOIT, I., SASPITURRY, N. eta SERRANO, O. 2020. «Role of structural inheritance and salt tectonics in the formation of pseudosymmetric continental rifts on the European margin of the hyperextended Mauléon basin (Early Cretaceous Arzacq and Tartas Basins)». *Marine and Petroleum Geology*, **118**, 104395.
- [29] FRANKE, D. 2013. «Rifting, lithosphere breakup and volcanism: Comparison of magma-poor and volcanic rifted margins». *Marine Petroleum Geology*, **43**, 63-87.
- [30] SIBUET, J.C., SRIVASTAVA, S.P. eta SPAKMAN, W. 2004. «Pyrenean orogeny and plate kinematics». *Journal of Geophysical Research*, **109** (B08104).
- [31] GALLAHUE, M.M., STEIN, S., STEIN, C.A., JURDY, D., BARKLAGE, M. eta ROONEY, T.O. 2020. «A compilation of igneous rock volumes at volcanic passive continental margins from interpreted seismic profiles». *Marine and Petroleum Geology*, **122**, 104635.

- [32] SCHRENBERGER, B., HINZ, K., FRANKE, D., NEBEN, S. eta ROESER, H.A. 2002. «Marine magnetic anomalies and the symmetry of the conjugated rifted margins of the South Atlantic». *American Geophysical Union Fall Meeting*, T52C-1217 83.
- [33] WITHJACK, M.O., SCHLISCHE, R.W., OLSEN, P.E. eta ZHANG, Q. 1998. Diachronous rifting, drifting, and inversion on the passive margin of central eastern North America: an analog for other passive margins. *AAPG bulletin*, **82**(5), 817-835.
- [34] CHOROWICZ, J. 2005. The east African rift system. *Journal of African Earth Sciences*, **43**(1-3), 379-410.
- [35] SUTRA, E. eta MANATSCHAL, G. 2012. «How does the continental crust thin in a hyperextended rifted margin? Insights from the Iberia margin». *Geology*, **40** (2), 139-142.
- [36] OSMUNDSEN, P.T eta REDFIELD, T.F. 2011. «Crustal taper and topography at passive continental margins». *Terra Nova*, **23**, 349-361.
- [37] PÉREZ-GUSSINYÉ, M., RANERO, C.R. eta RESTON, T.J. 2003. «Mechanisms of extension at nonvolcanic margins: Evidence from the Galicia interior basin, west of Iberia». *Journal of Geophysical Research*, **108** (B5).
- [38] DE CHARPAL, O., GUENOC, P., MONTADERT, L. eta ROBERTS, D.G. 1978. «Rifting, crustal attenuation and subsidence in the Bay of Biscay». *Nature*, **275** (5682), 706-711.
- [39] HOFFMAN, H.J. eta RESTON, T.J. 1992. «Nature of the S reflector beneath the Galicia Banks rifted margin; preliminary results from prestack depth migration». *Geology*, **20** (12), 1091-1094.
- [40] KRAWCZYK, C.M., RESTON, T.J., BESLIER, M.O. eta BOILLOT, G. 1996. «Evidence for detachment tectonics on the Iberia abyssal plain rifted margin». *NON: Proceedings of the Ocean Drilling Program: Scientific Results*, **149**, 603-615.
- [41] PINTO, V.H.G., MANATSCHAL, G., KARPOFF, A.M. eta VIANA, A. 2015. «Tracing mantle-reacted fluids in magma-poor rifted margins: The example of Alpine Tethyan rifted margins». *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **16**, 3271-3308.
- [42] INCERPI, N., MARTIRE, L., MANATSCHAL, G. eta BERNASCONI, S.M. 2017. «Evidence of hydrothermal fluid flow in a hyperextended rifted margin: the case study of the Err nappe (SE Switzerland)». *Swiss Journal of Geoscience*, **110** (2), 1661-8726.
- [43] INCERPI, N., MARTIRE, L., MANATSCHAL, G., BERNASCONI, S.M., GERDES, A, CZUPPON, G., PALCSU, L., KARNER, G.D., JOHNSON, C.A. eta FIGUEREDO, P.H. 2020. «Hydrothermal fluid flow associated to the extensional evolution of the Adriatic rifted margin: Insights from the pre- to post-rift sedimentary sequence (SE Switzerland, N Italy)». *Basin Research*, **32**, 91-115.
- [44] INCERPI, N., MANATCSCHAL, G., BARTIRE, L., BERNASCONI, S.M., GERDES, A. eta BERTOK, C. 2020. «Characteristics and timing of hydro-

- thermal fluid circulation in the fossil Pyrenean hyperextended rift system: new constraints from the Chaînons Béarnais (W Pyrenees)». *International Journal of Earth Sciences*, **109**, 1071-1093.
- [45] PLANKE, S., SYMONDS, P.A., ALVESTAD, E. eta SKOGSEID, J. 2000. «Seismic volcanostratigraphy of large-volume basaltic extrusive complexes on rifted margins». *Journal of Geophysical Research*, **105** (B8), 19335-19351.
- [46] BRONNER, A., SAUTER, D., MANATSCHAL, G., PÉRON-PINVIDIC, G. eta MUNSCHY, M. 2011. «Magmatic breakup as an explanation for magmatic anomalies at magma-poor rifted margins». *Nature Geoscience*, **4** (8), 549-553.
- [47] MOULIN, M., ASLANIAN, D., OLIVET, J.L. CONTRUCCI, I., MATIAS, L., GÉLI, L., KLINGELHOEFER, F., NOUZÉ, H., RÉHAULT, J.P. eta UNTERNEHR, P. 2005. «Geological constraints on the evolution of the Angolan margin based on reflection and refraction seismic data (ZaiAngo project)». *Geophysical Journal International*, **162** (3), 793-810.
- [48] HART, N.R., STOCKLI, D.F., LAVIER, L.L. eta HAYMAN, N.W. 2017. «Thermal evolution of a hyperextended rift basin, Mauléon Basin, western Pyrenees». *Tectonics*, **36**, 1103-1128.
- [49] MONTADERT, L. eta WINNOCK, E. 1971. L'Histoire structurale du Golf de Gascogne. DEBYCER, J., LE PICHON, X. eta MONTADERT, L. (Edk.). NON: *Histoire structurale du golfe de Gascogne*. Technip, Paris.
- [50] LE PICHON, X., BONNIN, J., FRANCHETEAU, J. eta SIBUET, J.C. 1971. Une hypothèse d'évolution tectonique du Golfe de Gascogne. DEBYCER, J., LE PICHON, X. eta MONTADERT, L. (Edk.). NON: *Histoire structurale du golfe de Gascogne*. Technip, Paris.
- [51] BODEGO, A. 2019. «Bizkaiko Golkoa, Pirinioak eta plaka-tektonika». URL: <https://zientziakaiera.eus/2019/06/06/bizkaiko-golkoa-pirinioak-eta-plaka-tektonika/> (2019ko ekainaren 6a).
- [52] NIRRENGARTEN, M., MANATSCHAL, G., TUGEND, J., KUSZNIR, N. eta SAUTER, D. 2018. «Kinematic Evolution of the Southern North Atlantic: Implications for the Formation of Hyperextended Rift Systems». *Tectonics*, **37**, 89-118.
- [53] TUGEND, J., MANATSCHAL, G. eta KUSZNIR, N.J. 2015. «Spatial and temporal evolution of hyperextended rift systems: Implication for the nature, kinematics, and timing of the Iberian-European plate boundary». *Geology*, **43**, 15-18.
- [54] LAGABRIELLE, Y. eta BODINIER, J.L. 2008. «Submarine reworking of exhumed subcontinental mantle rocks: field evidence from the Lherz peridotites, French Pyrenees». *Terra Nova*, **20**, 11-21.
- [55] ARANBURU, A., FERNÁNDEZ-MENDIOLA, P.A., LÓPEZ-HORGUE, M.A. eta GARCÍA-MONDÉJAR, J. 2002. «Syntectonic hydrothermal calcite in a faulted carbonate platform margin (Albian of Jorrios, northern Spain)». *Sedimentology*, **49**, 875-890.

- [56] LÓPEZ-HORGUE, M.A., IRIARTE, E., SCHRÖDER, S., FERNÁNDEZ-MENDIOLA, P.A., CALINE, B., CORNEYLLIE, H., FRÉMONT, J., SUDRIE, M. eta ZERTI, S. 2010. «Structurally controlled hydrothermal dolomites in Albian carbonates of the Asón valley, Basque Cantabrian Basin, Northern Spain». *Marine and Petroleum geology*, **27**, 1069-1092.
- [57] BODEGO, A., ARANBURU, A., IRIARTE, E., LÓPEZ-HORGUE, M.A. eta DAMAS-MOLLÁ, L. 2018. «Primeros datos de hidrotermalismo cretácico en el margen oriental de la Cuenca Vasco-Cantábrica». *Geogaceta*, **64**, 31-38.
- [58] MENDIA, M.S. eta IBARGUCHI J.I.G. 1991. «High-grade metamorphic rocks and peridotites along the Leitza Fault (Western Pyrenees, Spain)». *Geologische Rundschau*, **81**, 93-107.
- [59] LAMARE, P. 1936. «Recherches géologiques dans les Pyrénées basques d'Espagne». Doktorego tesia, *Mém. Soc. Géol. de France*, 464.
- [60] BODEGO, A., IRIARTE, E., LÓPEZ-HORGUE, A. eta ÁLVAREZ, I. «Rift-margin extensional forced folds and salt tectonics in the eastern Basque-Cantabrian rift basin (western Pyrenees)». *Marine and Petroleum Geology*, **91**, 667-682.
- [61] LAMOLDA, M.A. MATHEY, B., ROSSY, M. eta SIGAL, J. 1983. «La edad del volcanismo Cretácico de Vizcaya y Gipúzcoa». *Estudios Geológicos*, **39**, 151-155.
- [62] FERNÁNDEZ-MENDIOLA, P.A. eta GARCÍA-MONDÉJAR, J. 2003. «Carbonate platform growth influenced by contemporaneous basaltic intrusion (Albian of Larrano, Spain)». *Sedimentology*, **50**, 961-978.
- [63] AGIRREZABALA, L.M., SARRIONANDIA, F. eta CARRACEDO-SÁNCHEZ, M. 2017. «Diatreme-forming volcanism in a deep-water faulted basin margin: Lower Cretaceous outcrops from the Basque-Cantabrian Basin, western Pyrenees». *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **337**, 124-139.
- [64] CASTAÑARES, L.M., ROBLES, S., GIMENO, D. eta BRAVO, J.C.V. 2001. «The submarine volcanic system of the Errigoiti Formation (Albian-Santonian of the Basque-Cantabrian Basin, Northern Spain): stratigraphic framework, facies, and sequences». *Journal of Sedimentary Research*, **71** (2), 318-333.
- [65] RAT, P. 1959. «Les pays crétacés basco-cantabriques (Espagne)». Doktorego tesia, *Université de Dijon*, Dijon, 525 or.
- [66] CARRACEDO-SÁNCHEZ, M., SARRIONANDIA, F. eta JUTEAU, T. 2012. «El Vulcanismo Submarino de Edad Cretácica de la Cuenca Vasco-Cantábrica». *Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, **16**, 260-267.

