

Geografia eta Lurralde Antolakuntzako Gradua

Gradu Amaierako Lana

2021/2022 Ikasturtea

**PIRINIOETAKO GLAZIARREN HIGAKIN-ESTALKIAK:
AZKEN BI HAMARKADETAKO BILAKAERA (2000-2020)**

Egilea:

Ander Palacios Fraile

Tutoreak:

Eñaut Izagirre Estibaritz

Orbange Ormaetxea Arenaza

Letren Fakultatea

Geografia, Aurrehistoria eta Arkeologia Saila

LABURPENA

Egungo glaziarren eremuaren %4-7 inguru higakinez estalitako glaziarrek hartzen dute, eta hauen kopuruan eta azaleran hazkunde nabaria ematea espero da datozen hamarkadetan. Glaziar mota hauek urtze eremuan higakinen geruza jarraia aurkezten dutenak dira, eta presentzia esanguratsua dute Pirinioetako glaziarretan, egungo 21 glaziarretatik 14tan agertuta. Helburu nagusi bezala, egoera honetara iristeko prozesua aztertu da, mende honetako lehen 20 urteetan emandako bilakaera ikertuz, eta higakinen ekarpena areagotzeko joera antzeman da hemen ere, glaziarren azaleraren atzera-egite orokorrarekin batera. Urte ezberdinetako satelite-irudiak erabilita, eta 2000. eta 2020. urteetan burututako inbentarioetan oinarrituta, glaziarren azaleraren galera neurtu da lehenik. Estalki hauen inguruan esan dezakegu duela 20 urte dagoeneko agertzen ziren kasuetan nabarmenki hazi direla, eta beste zenbait kasutan estalkirik ez izatetik partzialki estalita egotera pasa direla. Higakinez estalitako glaziarren artean estalki hauek azaleraren %4,2 hartzetik %18,1 hartzera pasa dira. Gainera, eta bigarren xede gisa, higakin-estalkien agerpena glaziarren azaleraren galerarekin erlazioan jarri da, eta glaziar handi nagusietan oinarritu gara ikerketa hau aurrera eramateko; besteak beste, Aneto, Ossoue, Maladeta edo Monte Perdido glaziarretan, nahiz eta kasu guztiak aztertu diren dinamika ezberdinak kontuan hartuz.

Joera orokor batean, higakin-estalkia aurkezten duten glaziar horietan azaleraren galera txikiagoa eman da eta glaziar “txurietan”, berriz, galera deigarrienak, estalki hauek babes moduko bat ematen dutela antzeman dugularik. Baina badira beste zenbait faktore aintzat edukitzekoak, horregatik glaziar hauek hartzen dituzten mazizoen ezaugarri ezberdinak aipatzen dira, higakinen ekarpena baldintzatzen dutenak, baita glaziarrei ematen dizkieten beste babes motak ere. Oro har, material sedimentario eta metamorfikoz osatutako mazizoen kasuan higakinen ekarpena errazten dela esan dezakegu, eta honek aldi berean bertako glaziarren urtze prozesua moteltzen duela. Honekin ere argi geratu da klimak kontrolatutako eta faktore topo-klimatikoek kontrolatutako glaziarren bilakaeren artean badirela alde esanguratsuak higakin-estalkien agerpenari erreparatuz, eta lehenengoan kasuan, glaziar handienetan hain zuzen ere, higakin-estalkiek ez dute hainbesteko garrantzirik. Faktore honen eragina estalki motaren arabera ere bada, honen homogeneousotasunak ere babes hori baldintzatzen baitu eta azken finean eragile hauen guztien bilakaera aztertuta hobe uler dezakegu gure egungo glaziarren egoera.

AURKIBIDEA

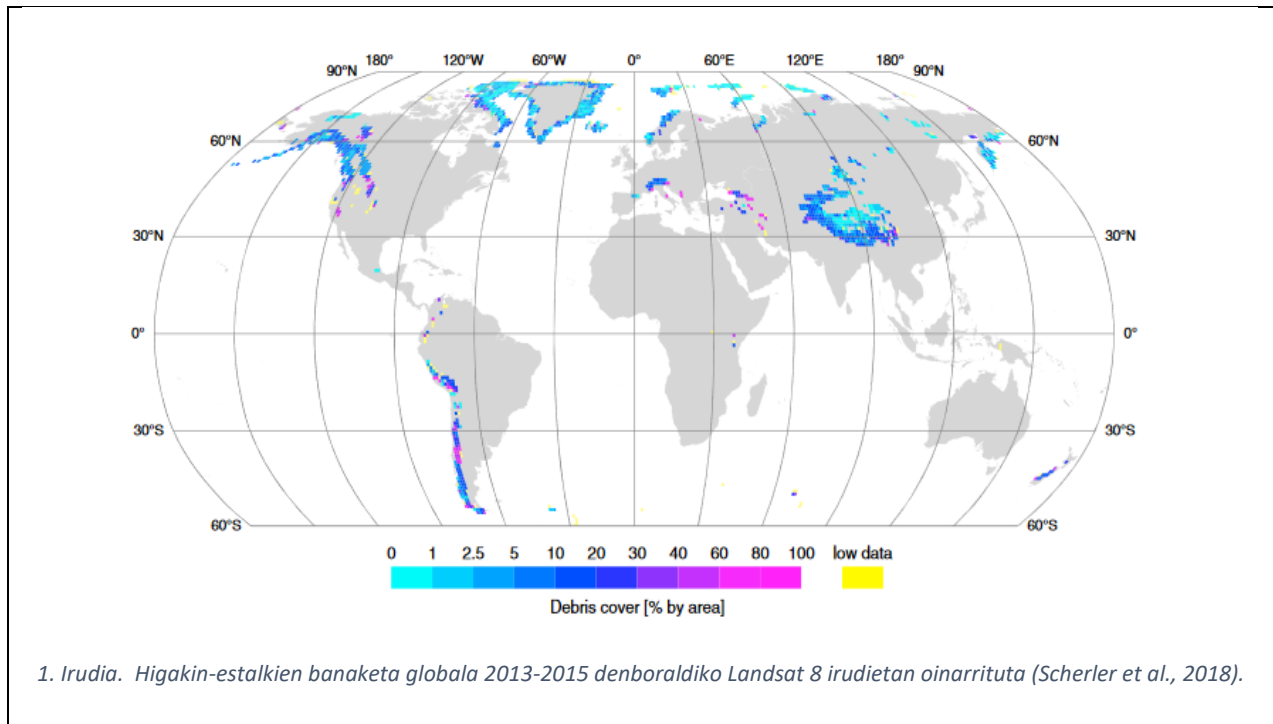
1. SARRERA	3
2. IKERKETA EREMUA	7
3. MATERIALA ETA METODOLOGIA	11
4. EMAITZAK.....	14
5. EZTABAIDA.....	24
6. ONDORIOAK.....	30
7. BIBLIOGRAFIA.....	33

1. SARRERA

Mundu mailan ematen ari den klimaren berotzea eta glaziarren atzera-egite orokorra klima aldaketarekin lotuta dagoela argi dakigu (IPCC, 2022). Glaziarren inguruan badira hainbat ikerketa mundu mailan, hauen jatorria, egungo ezaugarriak, bilakaera edota etorkizuna aztertu dutenak (e.g. Anderson et al., 2018). Pirinioetan ditugun glaziarren kasuan ere aski ikertu egin da, hauek txikiagoak izanda, eta kopuru aldetik ere gutxiago agertuz (e.g. García-Ruiz et al., 2020; López-Moreno et al., 2019; Vidaller et al., 2021). Hala ere, bada glaziarren inguruan hainbeste ikertu ez den esparru bat, hain zuzen ere, **higakin-estalkiena**. Estalki hauek glaziar baten zabalean hedatzen diren higakin supraglaziarrek osatzen dute (Kirkbride, 2011). Gaur egun, higakinez estalitako glaziarrek munduko glaziarren eremuaren %4-7 inguru suposatzen dutela kalkulatu da (Scherler et al., 2018; Herreid eta Pellicciotti, 2020), eta, nahiz eta hauen inguruko informazio gutxiago izan, glaziar sistema ezberdinen erantzuna klima-aldaketaren aurrean ulertzeko interes gero eta handiagoa dago. Datozen hamarkadetan, mendiko glaziarrek mehetu, txikiatu eta gutxitu ahala (Hugonnet et al., 2021), eremu hauetan geratzen den izotzaren proportzioa geroz eta handiagoa higakinez estalita egotea espero da, azkeneko hamarkadetakoa estalki hauen hedatzeko joera eta estalki gabeko izotzaren galera kontuan hartzen badugu (Herreid eta Pellicciotti, 2020).

Kontzeptu honen inguruan sakonki hitz egingen dugu lan honetan zehar, eta gai honi sarrera emateko asmoz, lehenik eta behin jakin behar duguna da glaziarretan aurki dezakegun elementu hau ez dela beti formazio hauetan agertuko, baina bai munduko eremu glaziar nagusietan (1. Irudia). Batez ere, Asiako Goi Mendia (Himalaia, Karakorum eta Hindu Kush osatzen duten eremuan), Kaukaso, Zeelanda Berriko Alpeak edo Andeak bezalako mendiko glaziar ugari eta erliebe altuko mendikateetan, baita zirkuko glaziar askotan ere, Sierra Nevada edo Alpeak bezala (Fleischer et al., 2020). Faktore askok baldintzatuko dute glaziar baten ezaugarriak, baita higakin-estalkien izatearena ere, besteen artean, mendi hegalean eta haranen litologiak eta topografiak adibidez. Izan ere, higakinen ekarpenerako baldintzatzaile nagusienetarikoak dira hauek (Fleischer et al., 2020). Estalki hauek osatzen dituzten sedimentuen jatorria askotarikoa izan daiteke, hala nola, inguruko arroken apurketa eta garraioaren ondorioz heldutakoak,

erorketa edo elur-jausiak bezalako prozesuen ondorio direnak, arroka-ohe edo aldeko higaduraren eraginez pilatutakoak, etab. (Gibson et al., 2016; Fleischer et al., 2020).



Definizio ugari eman dira glaziar mota hauen inguruan, batetik bestera asko alda daitezkeenak (e.g. Anderson, 2000; Kirkbride, 2011), baina esan dezakegu **higakinez estalitako glaziarrrak** (2. Irudia) urtze eremu edo ablazio zonaren gehiena zabalean estaltzen duen higakin supraglaziar geruza jarraia aurkezten duten glaziarrrak direla, normalean bukaera aldera lodiera handituz (Miles et al., 2020). Hauen berezitasunak ulertzeko, glaziar “txuriekkin” edo higakin-estalkirik gabekoekin alderatzea komenigarria da, hauen guztien bilakaerari arreta berezia jarritz. Hain zuzen ere, eboluzio horretan zentratuko gara gehien bat hemendik aurrera, estalki hauek glaziarren dinamika nola baldintzatzen duten ikusteko. Jakin badakigu glaziarren gainazaleko energia eta masa balantzea kontrolatzen dutela, zenbait ikerketek ondorioztatu duten moduan (Nicholson eta Benn, 2006), eta baieztatu dezakegu higakin-estalki mehe batek izotzaren urtze eta galera prozesuak areagotzen dituela albedo gutxitzean, estalki lodi batek ablazio indizea gutxituko duen bitartean, glaziarra isolatzen duelako, bere eroankortasun termiko baxua dela eta (Østrem, 1959).



2. Irudia. Higakinez partzialki estalitako Pasterzenkees glaziarra, Glocknergruppe, Austriako Alpeak (2016)

[eskuragarri hemen: wileyonlinelibrary.com] (Fleischer et al., 2020).

Glaziar baten masa balantzea temperatura eta prezipitazioen aldaketan menpe dago, mende honetan zehar masa galera azkartzea ekarri duena (Zemp et al., 2015; Solomina et al., 2016; Hugonnet et al., 2021). Halere, eskualde-mailan glaziarrek patroia eta joera ezberdinak erakusten dituzte egungo **klima-aldaketaren** aurrean, tokiko faktore topoklimatikoaren arabera, hauek ere higakinen ekarpena baldintzatuz. Erantzun posible hauetako bat glaziar txurietatik higakinez estalitako glaziarretara ematen den trantsizioa izan daiteke, eta ondoren, arroka glaziarretarako trantsizioa, Pirinioetan gertatzen ari den bezala (Ventura, 2020). Honen emaitza da Pirinioetan, beste eskualdeetan bezala, higakinez estalitako glaziarren bilakaera kontrolatzen duen sistema ez dela jatorriz bakarrik klimatikoa, prozesu paraglaziarrak paper garrantzitsu bat betetzen dute eta (Knight eta Harrison, 2014). Horregatik, glaziarren inguruko mendi hegaletako higakinen fluxua edota glaziarren azalean ager daitezkeen aintzira eta izotz-labarren bezalako faktore ez klimatikoaren garrantzia kontuan hartu behar da kasu hauetan (Racoviteanu et al., 2021).

Informazio hau kontuan hartuta, eta jarraian azalduko diren helburuei dagokienez, lan honetan zehar bi hipotesi nagusiren inguruan arituko gara. Alde batetik, higakin-estalkien

azalera eta hauen garrantzi erlatiboa hazi dela, hauek osotara jasandako aldaketak aztertuz, baita glaziar bakoitzaren azalera osoarekiko suposatzen duen zatia ere. Honekin, proportzioan handiagotze orokor bat eman dela frogatu nahi dugu, irakurketa osatuago eta fidagarriagoa lortuz. Bestalde, higakin-estalkia ageri den glaziar horietan guztizko azaleraren galera urriagoa eman dela frogatu nahi da, azaldutako moduan.

Bada, lan honetan Pirinioetako glaziarren **higakin-estalkiaren bilakaera** azken bi hamarkadetan (2000-2020 bitartean) izanen dugu helburu nagusi. Glaziarren hedadura azkeneko hamarkadetan nahikoa ikertu da (Rico et al., 2017; Anderson et al., 2018; Vidaller et al., 2021), eta harago joanez, hauen azaleraren atzera-egitearekin higakin-estalkien bilakaera **erlazioan jarri** nahi dugu. Hori dela eta, bigarren helburu nagusizat hau izanen dugu, hots, glaziarren azalera eta higakin-estalkiena alderatzea, higakin-estalkia dutenen eta ez dutenen arteko aldea ezagutzeko, hauen ezaugarrietan eta bilakaeran emandako diferentziak aztertuz.

Halaber, higakinez estalitako glaziarren arteko **ezberdintasunak zehaztea** hirugarren helburu gisa badugu, eta horretarako, bakoitzaren testuingurua aztertu eta ezaugarri geografiko ezberdinak ezagutzea beharrezkoa izanen dugularik.

Higakin-estalki ezberdinen ezaugarrien araberako aldaketak egotea espero da, bilakaerari dagokionez eta erabiliko diren urte ezberdinetako argazkietan aurkezten duten itxuraren aldetik ere. Honekin batera, mazizoen ezaugarri geologikoen **eragina** estalkien eta glaziarren bilakaeran ikertzea ere dugu xede. Kasu hauen artean joera zehatz batzuen adierazgarri izan daitezkeen adibideak aurkitzea ere espero da, eta ikerketa-kasu partikularrak bilatu hipotesi baten edo besteren alde aurkezteko.

2. IKERKETA EREMUA

Lan honen ikerketa eremua Pirinioen mendikatea dugu ($42^{\circ}40'00''\text{I}$, $1^{\circ}0'00''\text{E}$), Europako hego-mendebaldean kokatuta, Iberiar penintsula eta kontinentearen gainerako lurraldeak tektonikoki elkartuz. Mendebalde-ekialde norabidean 450 Km baino gehiago luzatzen da, Euskal Herritik Kataluniara, 50.000 Km² baino gehiagoko azalera. Mendikateko altitudeei erreparatuz, 500 m-tik, 3.404 m-ko gehieneko altitude batera iristen da (Amblar-Francés et al., 2020), eta bere hedaduran zehar ezaugarri ezberdinetako zonaldeak bereiz ditzakegu.

Egitura hidrologikoari dagokionez, nolabaiteko homogeneotasuna ematen da mendikatean zehar. Oro har, ibai sareak sortutako haran nagusien orientazioa dela eta (ipar-hegoalde), erliebea modu argi batean zatituta aurkitzen da, Pirinioen egiturarekiko elkartut. Klimatikoki ordea, bere kokapenagatik, alde batetik ozeano Atlantikoko influentzia klimatikoa jasotzen du, eta bestetik, ekialdeko Mediterraneokoa. Topografiak aurkezten duen heterogeneotasunaren ondorioz, aldakortasun nabaria antzematen da prezipitazio eta tenperaturen banaketan (del Barrio et al., 1990; García-Ruiz et al., 2001). Eremu menditsuetan, urteko prezipitazioek 2.000 mm-ak gainditzen dute, baita 2.500 mm-etara iritsi arren garaienetan (García-Ruiz et al., 2001), eta prezipitazio hauek gehien bat neguan jasotzen dira mendebaldeko zonaldean, ekialdekoan gehienak udaberri eta udazkenean jasotzen diren bitartean (Amblar-Francés et al., 2020). Tenperaturei dagokienez, urteko batezbestekoa murrizten doa iparralderantz eta altueran gora egin ahala, gradiente termikoa $0,6^{\circ}\text{C}$ -koa delarik 100 metro bakoitzeko. Mazizo garaienetan 0°C azpiko batezbesteko urteko tenperatura ohikoa da, eta urteko 0°C -ko isoterma 2.950 m-ko altitudetan kokatuta dago (López-Moreno et al., 2019).

Hasieran aipatutako bereizgarritasun horiek aztertzeko, mendikate honen jatorriari erreparatuko diogu lehenik, non, gehien bat orogenia hertziniar eta alpetarraren eragina eman den. Prozesu geologiko hauen eraginez Pirinioak egitura eta forma hartuz joan ziren. Hasiera batean, Paleozoiko amaierako Devoniar eta Permiar garaien artean (duela 280 eta 180 milioi urte artean) orogenia hertziniarrarekin Zonalde Axiala izenarekin ezagutzen dugun horretan izan zuen eragin nagusia, Erdiko eremu hau ekialderantz hedatuz. Bertan aurkitzen diren material paleozoikoen artean, eskistoa da nagusi,

kuartzita eta kareharriarekin batera, tolestura eta faila anitzeko eremu batean. Zonalde honetan, Panticosa, Posets, Perdiguero, Maladeta edo Andorra-Puigpedrós-eko granitobatolito handiak ageri dira, besteak beste, kuartzita eta marmolez osatutako ertz metamorfikoz inguratuta (García-Ruiz et al., 2020). Pirinioen sektore zabal hau Karboniferoan zehar tolestu bazen ere, mendikatearen erabateko altxatzea Alpetar orogeniarekin (duela 65 milioi urte) eman zen. Egituraren ezaugarri nagusiak orduan garatu ziren, Zonalde Axialaren ipar eta hegoaldean aro Mesozoikoko erliebe egiturak aurki ditzakegularik. Hauen artean, hegoaldean Barnealdeko Mendilerroak ditugu, baita Flysch sektorea, Barnealdeko Depresioa edota Kanpoaldeko Mendilerroak ere (Gibbons eta Moreno, 2002).

Barnealdekoen kasuan, Zonalde Axialean gertatzen den moduan eta gure gaiari helduz, zirku glaziar ugari ageri dira, U itxurako haranak eta glaziarrek gainhondeatutako kubetak bezalako azken glaziazioetako beste egiturekin batera (García-Ruiz et al., 2013). Izan ere, bi eremu hauetan aurkitzen dira mendikate honetako glaziarrak. Azkeneko izotzaldian, Pirinioetan emandako izotz hedadura handiena, duela 60.000 urte inguru izan zen (Lewis et al., 2009; Sancho et al., 2018), mundu mailako Azken Glaziar Maximoa (LGM ingelesez) baino askoz lehenago. Glaziarren inguruan, aipatu beharra dago egun Pirinioetan aurkitzen direnak Europako hegoaldekoenak direla, glaziar txiki bezala sailka ditzakegunak, ez baitute 0,5 Km²-ko (50 ha) azalera gainditzen (Vidaller et al., 2021). Hauen artean handiena Aneto-koa da, bere egungo azalera 47 ha-koa delarik, eta bizpahiru salbuespenez gain, ez dira 10 ha-tara iristen, aurrerago ikusiko dugun bezala. Duela bi hamarkada askoz handiagoak ez baziren ere, murrizketa nabaria egon da glaziarrek estalitako azalera, baita glaziar txiki hauen kopuruan ere (Rico et al., 2017; Vidaller et al., 2021).

2000. urteko inbentarioaren arabera (*7.0 bertsioa errebisio fasean* dago; RGI Consortium, 2017), Pirinioetako glaziarrek 441 ha-ko azalera hartzen zuten osotara, hauetako handiena Anetoko glaziarra izanda. Aldiz, 2020ko inbentarioak erakusten duen moduan, 229 ha-ko azalera baino ez dute suposatzen glaziar guztien artean, Anetokoa handiena izaten jarraituz (Vidaller et al., 2021). Datu orokor hauetatik zehatzagotara pasatzen hasteko, esan beharra dago Pirinioetako mazizo bakoitzak bere ezaugarri eta berezitasunak dituela, eta hauetako bakoitzean kokatzen diren glaziarrekin antzeko zerbait gertatuko dela, haien artean bereizgarri amankomun batzuk aurkituko baditugu ere, hurrengo ataletan ikusiko

dugun bezala. Horretarako, lehenik eta behin mazizo hauen (3. Irudia) azaleko ezaugarriketa bat egitea komeni da, oinarrizko informazio bat izateko, aurrerago lagungarria izanen zaiguna ikerketaren jarraipenerako. Geologiaren alorra da batez ere interesgarrien suerta daitekeena higakin-estalkien azterketan.



3. Irudia. Pirinioetan glaziarren bat duten mazizoen mapa. Egileak eginda.

Aztergai ditugun glaziar hauek (3. Irudia) barne hartzen duten lehen mazizoa, mendebaldetik ekialdera, Balaitous da. Gaingiroki azalduta, nagusiki granitoz osatutako mazizoa dugu honako hau, Oligozeno berantiarreko duela 20 eta 30 milioi urte arteko plutoi granitiko batean jatorria duena (V. Bosch et al., 2016), hau da, granitozko intrusio igneo batean (Schofield et al., 2020). Aldiz, jarraian dagoen Picos del Infierno mazizoa izatez metamorfikoa da, Devoniar garaiko kareharriz, marmolez eta kuartzitaz osatuta (Cuchí et al., 2017).

Gavarnie-Monte Perdido mazizo kareduna da, bertan ematen den litologia Kretaziko bukaerako eta Paleogeno hasierako kareharriz osatuta, eta prozesu karstikoek presentzia

handia dute (Nicolás-Martínez, 2013). Jarraian eta litologikoki bat etorri aurkitzen den Munia mazizoan, bere material geologikoen artean kareharriak, marmolak, siliziklastikoak, arbelak, Devoniar garaiko kuartzitak edota arroka granitiko intrusiboak aurki ditzakegu (Ríos et al., 1989; Robador et al., 2010). Ekialderago, Posets mazizoan ezaugarri oso antzekodun litologia deskribatzen da, arbela, Paleozoikoko kareharri biziki tolestatu eta granitoideen segida batez osatuta (Serrano et al., 2002).

Honen ipar-ekialdean Perdiguero mazizoa aurkitzen da, zeinek, bere goiko partean, granito porfirikoz osatutako koroa daukan, eta kuartzo-dioritaz osatutako barnealdea, baita meta-sedimentu ugari ere (Martínez de Pisón, 1990). Honen alboko Maladeta-Anetoko mazizoan granitoen agerpena are esanguratsuagoa da, non, askotariko kristalekin batera eta bariazio ezberdinak tartekatuz arroka nagusia den. Zehazki, granodiorita, edota biotita, moskovita eta kordieritarekin agertzen den granito motak aurki daitezke, feldespatoeekin batera (Martínez de Pisón, 1990).

Gaur egun Pirinioetan ditugun glaziarrak mendikateko mazizo garaienetan (3. Irudia) daude eta hurrengoak dira, berriz ere mendebaldetik ekialdera, 21 osotara: Balaitous mazizoan **Las Neous** (1), Picos del Infierno mazizoan **Erdiko Infiernos** (2), Vignemale mazizoan **Ossoue** (3), **Oulettes de Gaube** (4) eta **Petit Vignemale** (5), Gavarnie-Monte Perdido mazizoan **Gabietous** (6), **Taillon** (7) eta **Monte Perdido (Goikoa eta Behekoa)** (8, 9), Munia mazizoan **Munia** (10), Posets mazizoan **Llardana** (11) eta **La Paul** (12), Perdiguero mazizoan **Seil de la Baque** (13), **Portillon** (14) eta **Boum** (15), Maladeta-Aneto mazizoan **Maladeta (Mendebaldekoa eta Ekialdekoa)** (16, 17), **Aneto** (18), **Barrancs** (19) eta **Tempestades** (20), eta azkenik Mont Valier mazizoan **Valier** (edo d'Arcouzan) (21) glaziarra. Hauez gain, eztabaida sor ditzaketen beste bi ditugu, Astazou eta Mendebaldeko Pailla.

2000. urteko inbentarioari erreparatuz, 46 zirela ikusiko dugu, hots, egungoen bikoitza baino gehiago. Inbentario berrienarekin alderatuta, jada desagertu diren glaziarrak hurrengoak dira, mendebaldetik ekialdera: Frondiellas, Infiernos (Mendebaldekoa eta Ekialdekoa), Pabat, Punta Zarra, Clot de la Hount, Monferrat, Casque, Ekialdeko Pailla, Marbore, Cilindro (Mendebaldekoa eta Ekialdekoa), Soum de Ramond, Tourrat, Pays Bache, Barroude, Posets, Gourgs Blancs, Seil de la Baque (Mendebaldekoa) Portillon d'Oo, Cabrioules, Graues, Coronas eta Salenques.

3. MATERIALA ETA METODOLOGIA

Aurrera eramandako ikerketa honen helburuak lortzeko Pirinioetako glaziarren inbentario ezberdinak erabili ditugu, autore anitzek argitaratutako inbentarioak hain zuzen ere. Honekin batera, urte ezberdinetako satellite-irudiak oinarritzat hartu dira, inbentario hauen laguntzaz hainbat neurketa eta mugaketa burutzeko.

Alde batetik, glaziarrek hartzen duten eta duela bi hamarkada hartzen zuten azalera orokorra neurtzeko bi inbentarioren informazioa erabili dugu; lehena, *Randolph Glacier Inventory* (RGI) izeneko, 2000. urteko glaziarren hedadura lortu ahal izateko (*7.0 bertsioa errebisio fasean* dago; RGI Consortium, 2017), eta bestetik 2020. urteko azken inbentario eguneratua (Vidaller et al., 2021). Horrela, azkeneko bi hamarkadetan Pirinioetako glaziarrek jasandako bilakaera aztertzeko aukera izan dugu, eta, bereziki, higakin-estalkien eta hauek babesten duten izotz masen eboluzioa zehazteko. Sarreran helburuen inguruan aipatutako moduan, oinarri gisa arituko diren datu hauen inguruan nahiko ikertu bada ere, oinarritzko eragiketa hauek beharrezkoak ikusi ditugu. Modu honetan ondorengo neurketak, higakin-estalkienak hain zuzen ere, hasierako hauekin konparatu ahalko ditugu, eta horrela akats larriak ekidin, besteak beste, geolokalizazio edo proiektzio erroreekin, edota eskuzko delineazio eta prozesaketekin eman daitezkeenak.

Helburu nagusiari dagokionez, 2000, 2011 eta 2020ko satellite-irudi mota ezberdinak (1. Taula) erabili dira ArcMap-en, inbentarioren poligonoen laguntzaz higakin-estalkiak mugatu ahal izateko. Hauen gainean, eta irizpide bisualak erabilita, higakin-estalkien poligonoak irudikatu ditugu, banan-banan glaziar bakoitzaren kasua aztertzen. Lan hau modu egokiago batean burutu ahal izateko, droneen bitartez ateratako argazkiak ere baliatu ditugu glaziar batzuen kasuan haien estalkia neurtzeko, erresoluzio handiagoko irudiak baitira hauek (Vidaller et al., 2021). Gainera, ArcMap-ek berak eskaintzen duen oinarritzko mapetako bat ere baliagarri izan zaigu beste zenbait neurketen kasuan. ArcMap software honen bitartez burutu dira lan honen eginkizun tekniko gehienak, bertan kargatu baitira aipatutako satellite-irudi guztiak, inbentario ezberdinen geruzak, etab. Berriz ere helburuei helduta, aipatutako glaziar estalkidun eta estalkirik gabekoen arteko ezberdintasunak eta joera orokorrak begi hutsez antzemateko, Google Earth-eko irudiak

ere erabili izan dira. Halaber, hemendik lortutako hainbat irudi eta bertan marraztutako beste zenbait poligono ArcMap-era esportatu dira aurreko urratsean euskarri gisa erabili ahal izateko.

1. Taula. Erabilitako satelite-irudien informazioa.

Data	Mota	Sentsorea	Erresoluzioa	Iturria
1997/09 2000/07	Argazki aereoak (ortoirudiak)	WILD 15/4 UAG-S kamera	0,5 m	SIGPAC Hegaldia (Nekazaritza Ministerioa)
2000/08/08 2000/09/09	Satelite-irudiak	Landsat 7 ETM+	15-30 m	Estatu Batuetako Geologia Zerbitzua (USGS)
2011/08/19 2011/09/06 2011/10/11	Satelite-irudiak	RapidEye Earth- imaging System (REIS)	5 m	Planet Labs
2020/09/08 2020/09/12 2020/09/13 2020/09/14	Satelite-irudiak	PlanetScope DOVE	3-4 m	Planet Labs
2020/08/25 2020/09/04 2020/09/11 2020/09/12 2020/09/13 2020/09/30	Argazki aereoak (ortomosaikoak)	SenseFly eBee-Plus, eBee-X eta DJI Mavic Pro 2 droneen kamerak	0,2-0,5 m	Vidaller et al. (2021)

Aipatutako bi inbentario horiez gain, garai honen tarteko beste bi momenturen argazkiak bailiran, beste bi inbentarioren informazioa kontuan hartu izan da, 2011koa eta 2016koa hurrenez hurren (Vidaller et al., 2021; Rico et al., 2017). Azken bi hauek batez ere bereziak suertatu diren kasuetan erabili dira, hau da, glaziar baten bilakaeran joera orokorraren aurkako ezaugarriak agertu direnean. Horrela, tarteko neurketak eginez, irakurketa zehatzago bat lortu izan ahal dugu beharrezkoa izan den kasuetan, argazki batzuen akatsak azaleratuz eta hauen gainean zuzenketak aplikatuz, baita joera zehatz batzuk konfirmatuz ere.

Prozesu honetan zehar nabarmendu beharreko alderdi garrantzitsuenetarikoa bat jarraitutako irizpideak dira. Esan bezala, bisualki burututako lanaz ari gara, hortaz, poligonoak marrazteko orduan, eta, batez ere, higakin-estalkiak identifikatzerakoan, kontzeptu honen zehaztapena gakoa izan da. Kasu honetan irizpide nagusia higakinen azalera homogeneoa izatea izan da, hau da, ia hutsunerik gabeko higakinen eremu jarraia, izotzaren gainean kontraste nabaria egiten duena erabilitako irudietan. Horrela, modu garbi batean ikusten ez diren, edo solte eta sakabanatuta agertzen diren higakinen kasuan ez dira estalki horren azalaren parte bezala kontsideratu. Aldi berean, kolore eta ehundura ezberdinak banandu izan dira estalki zehatz batzuen barruan sartzea erabakitzeke orduan, hala nola, elur zaharren kasuan, glaziarraren estali gabeko ohiko izotz zatiaren parte dena, baina daraman denboragatik nolabait zikindua, eta askotan higakinekin nahas daitekeena (4. Irudia).



4. Irudia. Gabietous glaziarraren airetiko bista. Oinarritzko irudia: drone bidezko argazki aereo (ortomosaikoa).

Azaldutakoaren adibide gisa Gavarnie-Monte Perdido mazizoan kokatzen den Gabietous glaziarra hartu dugu, irudian (4. Irudia) modu argi batean ikusten baita aipatutakoa. Ikerketa-kasu hau erabili izan da higakin-estalkien irizpidea zehazteko orduan, ikus daitekeen bezala, kolore eta testura ezberdinen muga nahiko nabaria delako materialen arabera. Horrela izanda, argazkiaren goiko partean, glaziarraren aurrealdea nolabait inguratzen duen estalki jarraia marroi kolorez ikusten da, izotz masa estali gabekoarekin ezberdinduz, aldi berean izotz “garbi” eta elur zaharraren arteko muga begi bistan geratzen delarik.

4. EMAITZAK

Askotariko joera eta bilakaerak eman direla antzeman daiteke neurketa eta irudikapen ezberdinak burutu ahala, eta lortutako horri zentzua emateko, lehenik modu ordenatu batean azaltzea beharrezkoa da, datuen aniztasun hau testuinguruan jarriz. Prozesu honetan zehar lortutako emaitza esanguratsuenak ondorengo taulan (2. Taula) bildu ditugu, datu nagusiak modu argi eta sinplifikatu batean aurkezteko asmoz.

Horrela, urte ezberdinetako irudiak aztertu ondoren, helburu nagusizat dugun higakin-estalkien bilakaerari helduta, hauen egungo egoerari erreparatu diogu. Lehenik ikusi duguna da Pirinioetako egungo 21 glaziarretatik 14k badutela higakin-estalkia, txikiagoa edo handiagoa, baina azaleraren zati bat behintzat higakinez estalita. Honek glaziarren bi heren suposatzen ditu, beste herena glaziar “txuriek” osatzen dutelarik. Estalkia duten horiek Erdiko Infiernos, Oulettes de Gaube, Gabietous, Taillon, Monte Perdido Behekoa, Munia, Llardana, La Paul, Seil de la Baque, Portillon, Maladeta Mendebaldekoa,

Maladeta Ekialdekoa, Aneto eta Tempestades dira. Hauen artean, aipatzekoa da 9 kasutan higakin-estalkiak azalera osoaren %10 baino gehiago suposatzen duela, hortaz, beste 5etan erlatiboki nahiko azalera gutxi hartzen dutela esan daiteke, La Paul, Seil de la Baque, Maladeta Ekialdekoa, Aneto eta Tempestades. Batez beste, higakin-estalki hauek glaziarraren azaleraren %18,1 hartzen dute.

Helburu berarekin jarraituz, aipatu beharra dago higakin-estalkia agertzen zaigun kasu horietan guztietan honen **hazkunde** bat eman dela (2. Taula), gehienetan hasierako estalki txiki batetik estalki hedatuago batera pasatuz. Egoera hau (taulan grisez) Erdiko Infiernos, Gabietous, Taillon, Munia, Llardana eta Tempestades glaziarretan antzeman daiteke. Halaber, beste zenbait kasutan higakin-estalkirik gabeko jatorrizko egoera batetik, estalkidun egoera batera ere trantsizioa eman da (taulan berdez), Oulettes de Gaube, Monte Perdido Behekoa, La Paul, Seil de la Baque, Portillon, Maladeta Mendebaldekoa, Maladeta Ekialdekoa eta Anetoren kasuetan bezala. Hirugarren talde batean, denboraldi honetan zehar aldaketarik erakutsi ez dutenak ditugu, hau da, inolako higakin-estalkirik ageri ez den horietan. Azkeneko hauen adibide (taulan txuriz) Les Neous, Ossoue, Petit Vignemale, Monte Perdido Goikoa, La Paul, Boum eta Barrancs glaziarrak ditugu.

Hausnarketa sakonagoa eskatzen duten alderdiak hurrengo atalean, eztabaidan, garatuko dira dagokien ikuspuntutik. Taula honetan irudikatutako datuak modu honetan antolatu dira: mazizo bakoitzeko glaziarren izenak ageri dira, hauen barruan 2000. eta 2020. urteetako datuen artean bereizketa eginez, non, lehen maila orokor batean hauetako bakoitzaren azalera guztizkoa hektareatan (ha) adierazita ageri den, batetik bestera emandako azaleraren galerarekin (proportzionalki) batera. Jarraian, bi urte hauetan antzemandako higakin-estalkien azalera guztizkoa hektareatan azaltzen da, baita glaziarraren azalerarekiko suposatzen duen proportzioa ere, eta azkenik proportzio hauen arteko diferentzia (2000 eta 2020 artekoa).

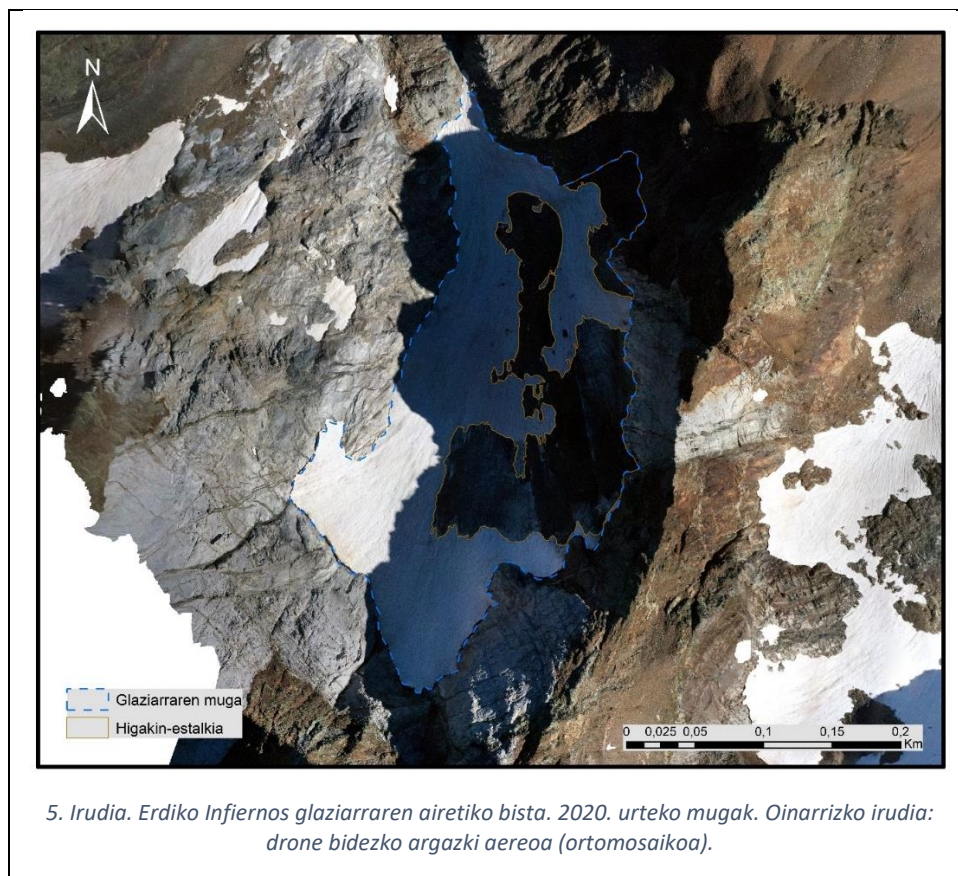
2. Taula. Glaziarren eta haien higakin-estalkien bilakaeraren datuak. Grisez: higakin-estalkiaren hazkundera jasan duten glaziarrek. Berdez: higakin-estalkirik ez zuten eta orain baduten glaziarrek. Txuriz: higakin-glaziarrik ez duten eta izan ez duten glaziarrek.

PIRINIOETAKO GLAZIARREN ETA HIGAKIN-ESTALKIEN BILAKAERAREN ZIFRAK							
MAZIZOA	GLAZIARRA	URTEA	GLAZIARRAREN AZALERA (ha)	GALERA (%)	HIGAKIN-ESTALKIAREN AZALERA (ha)	HIGAKIN-ESTALKIEN GLAZIARRAREN AZALERAREKIKO (%)	DIFERENTZIA (%)
Balaitous	Les Neous	2000	7,9	66,58	-	-	-
		2020	2,64		-	-	
Picos del Infierno	Erdiko Infiernos	2000	6,7	14,52	0,6	8,96	26,43
		2020	5,7		2	35,38	
Vignemale	Ossoue	2000	61	53,77	-	-	-
		2020	28,2		-	-	
	Oulettes de Gaube	2000	15,7	40,76	-	-	33,33
		2020	9,3		3,1	33,33	
	Petit Vignemale	2000	3,1	25,81	-	-	-
		2020	2,3		-	-	
Gavarnie-Monte Perdido	Gabietous	2000	9,5	13,68	0,4	4,46	19,03
		2020	8,2		1,8	23,49	
	Taillon	2000	13,9	31,29	0,6	3,98	16,9
		2020	9,1		1,9	20,88	
	Monte Perdido Behekoa	2000	34,5	17,39	-	-	12,63
		2020	28,5		3,6	12,63	
	Monte Perdido Goikoa	2000	7,2	19,44	-	-	-
		2020	5,8		-	-	
Munia	Munia	2000	4,6	8,7	0,2	3,76	46,24
		2020	4,2		2,1	50	
Posets	Llardana	2000	9,9	22,22	0,3	2,81	12,77
		2020	7,7		1,2	15,58	
	La Paul	2000	11,4	27,19	-	-	4,82
		2020	8,3		0,4	4,82	

Perdiguero	Seil de la Baque	2000	13,6	38,24	-	-	8,27
		2020	8,4		0,7	8,27	
	Portillon	2000	5,5	43,64	-	-	12,9
		2020	3,2		0,4	12,9	
	Boum	2000	8,4	60,71	-	-	-
		2020	3,3		-	-	
Maladeta-Aneto	Maladeta Mendebaldekoa	2000	8,1	25,93	-	-	25
		2020	6		1,5	25	
	Maladeta Ekialdekoa	2000	34,6	38,73	-	-	4,25
		2020	21,2		0,9	4,25	
	Aneto	2000	77,3	36,17	-	-	1,42
		2020	47,3		0,7	1,42	
	Barrancs	2000	10,6	56,6	-	-	-
		2020	4,6		-	-	
	Tempestades	2000	10,8	32,41	0,1	1,03	3,9
		2020	7,3		0,4	4,93	
Valier	Valier	2000	2	<i>Aldaketarik ez da egon</i>	-	-	-
		2020	2		-	-	

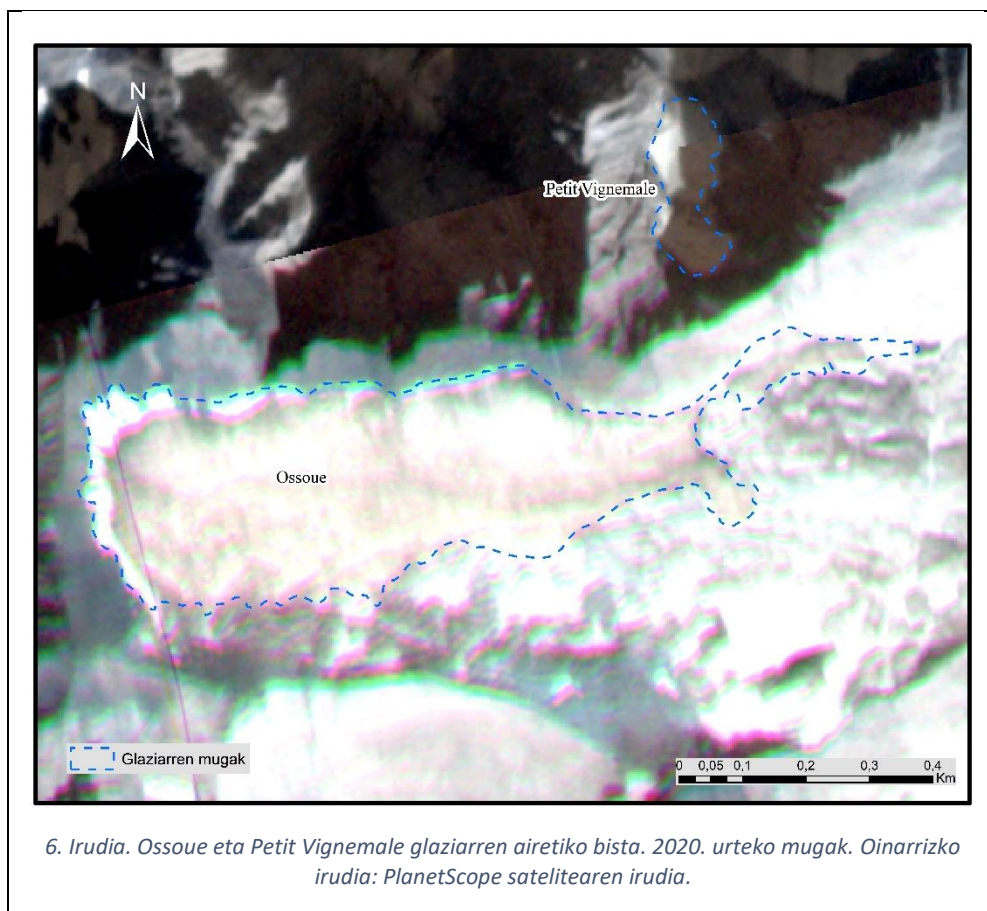
Jarraian, lehenengo bi helburuen emaitzak azalduko dira, hau da, oraingoan glaziarren atzera-egitea ere kontuan hartuta. Datu hauen azalpena lurraldez erabilitako egitura baten bitartez egingen da, mazizo ezberdinetako glaziarrek taldekatuz, mendebaldetik ekialderako hurrenkeran. Taulan ikus daitekeen moduan, lehenengo mazizoa **Balaitous**-ekoa daukagu, non, Les Neous glaziarra aurkitzen den. Ikerketa lan honi hasiera emateko adibide ona izan da, izan ere, datu interesgarriak utzi dizkigu gure helburuei erreparatuz. Glaziar honek bere azaleraren %66,58 galdu du azken bi hamarkadetan, eta higakin-estalkirik aurkezten ez duen glaziar horietariko bat da. Glaziar erabat txuria zen 2000. urtean, baita gaur egun ere.

Picos del Infierno mazizora pasata, Erdiko Infiernos glaziarra (5. Irudia) daukagu, Les Neous glaziarra bezala tamaina aldetik nahiko txikia dena, 5,7 ha-ko azalerarekin. Duela bi hamarkada bi glaziar hauek antzeko hedadura bazuten ere, 2020ko inbentarioetan neurtutako moduan, Erdiko Infiernos aurrekoaren bikoitza da, honek askoz azalera gutxiago galdu baitu, %14,5 baino ez, glaziar guztien artean gutxien galdu duen horietariko bat izanik. Glaziar honek 0,6 ha-ko higakin-estalki oso txiki bat zeukan 2000. urtean, bere azalera totalaren %9 estaliz, baina 20 urtetan estalki honen bilakaerak erakusten digu asko hazi dela, eta egungo glaziarraren %35,4 estaltzen duela, 2 ha-ko azalerarekin. Glaziar hauen guztien artean, hau da higakin-estalkia gehien hazten ikusi duenetarikoa.



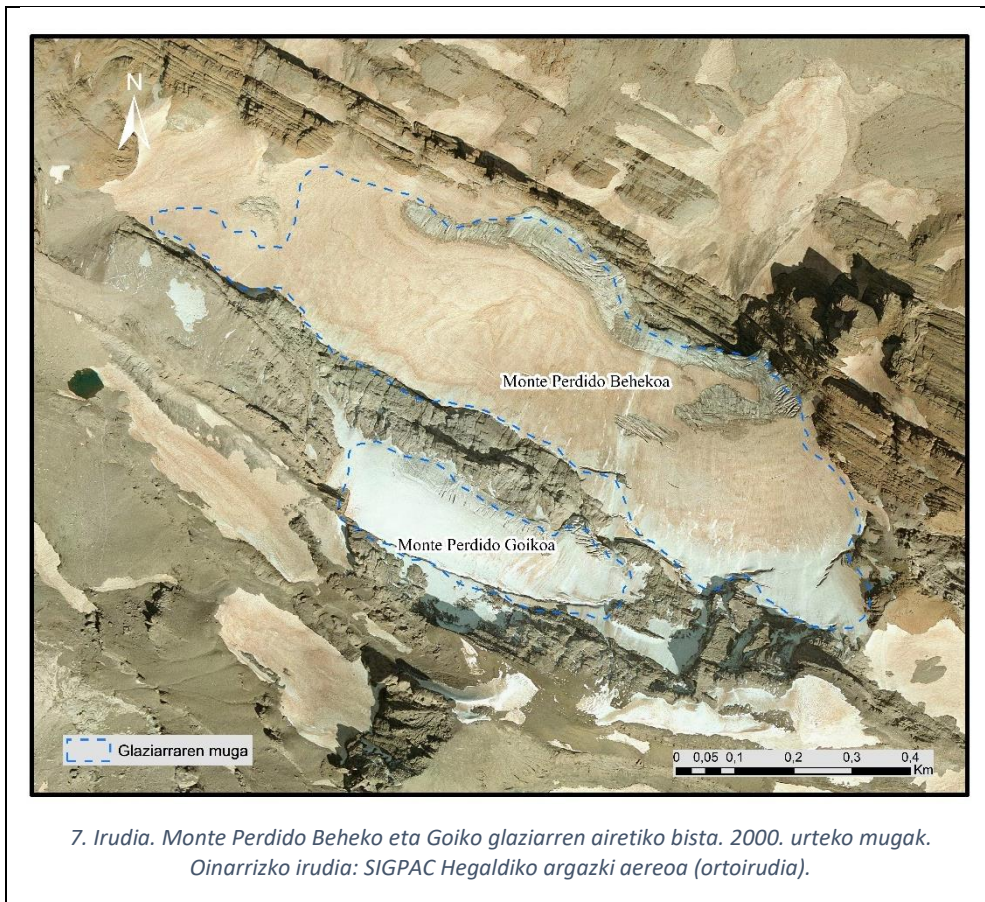
Hurreneko mazizoa aztertuko ditugunen artean garrantzitsuenetikoa da, **Vignemale**-koa, non, bigarren glaziarrik handiena azaltzen den, Ossoue. Gaur egungo azalera 28,2 ha-koa bada ere, azken 20 urtetan azalera gehien galdu duen horietariko bat da (%53,77). Beste kasu batzuetan gertatzen den bezala, Ossoueko glaziarrak ez dauka higakin-

estalkirik, eta ez du honen agerpenik ere izan azken bi hamarkadetan, urte ezberdinetako satellite-irudietan antzeman daitekeen moduan (6. Irudia). Aldiz, mazizo bereko ipar aurpegian dagoen Oulettes de Gaube glaziarrari erreparaturaz, ikusiko dugu honek bai higakin-estalkia duela, glaziarraren azaleraren herena estaliz. Glaziar honek osotara %40,76 galdu du 20 urtetan, gaur egun 10 ha baino gutxiago mantenduz. Mazizo honetan ageri den azkeneko glaziarra Petit Vignemale dugu (6. Irudia), hiruren artean txikiena, 3 ha baino gutxiagorekin, eta aldi berean azalera gutxien galdu duena, %25,81. Honek ez du higakin-estalkirik aurkezten denbora tarte honetan zehar.



Hurrengoa, **Gavarnie-Monte Perdido** mazizoa dugu ondorengo lau glaziarrekin; Gabietous, Taillon eta Monte Perdido Beheko glaziarrean higakin-estalkiak ageri dira, Monte Perdido Goikoa estalkirik gabekoa den bitartean (7. Irudia). Azken honek bere azaleraren ia %20a galdu du, 5,8 ha-tan geratuz. Aldiz, Monte Perdido Behekoa handiena izanda 28,5 ha-ko azalarekin, %17,4 galdu du azkeneko bi hamarkadetan, eta gaur

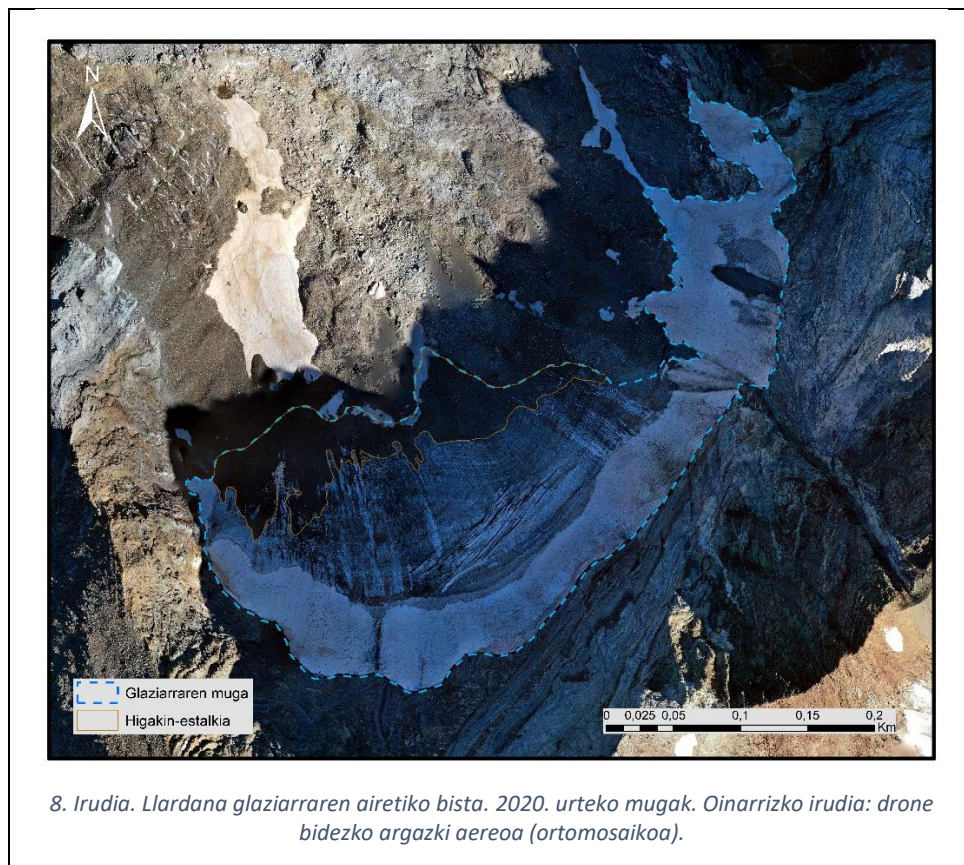
egungo irudietan oinarrituta glaziarraren azaleraren %12,6 higakinez estalita badago ere, 2000. urtean inolako estalkirik ez zuela aipatu beharra dago (7. Irudia). Gabietous eta Taillon glaziarren antzeko bilakaera jasan dute alde honetatik, izan ere, estalki txiki bat aurkezten zuten duela 20 urte (%4 inguruko estalpena) eta 2020ko irudien arabera hauen azaleraren %19,03 eta %16,9 dute higakinez estalita hurrenez hurren.



Muniako mazizoan izen berdineko glaziarra kokatzen da, guztien artean azalera gutxien galdu duena azkeneko bi hamarkada hauetan zehar. Aipatutako inbentarioen arabera, galera hau %8,7-koa baino ez da izan, 4,6 ha-tik 4,2 ha-ra pasatuz. Aldi berean, Muniako glaziarrak duela 20 urte higakin-estalki gutxieneko bat izanda, 0,2 ha-koa, azkeneko irudien arabera estalki honek glaziarraren erdia hartzen du, 2 ha inguruko azalera batekin.

Jarraian Llardana eta La Paul glaziarrak ditugu **Posets** mazizoan, azalera nahiko txikiko bi glaziar. Ez dira 10 ha-tara iristen, baina duela 20 urte ere hauen hedadura ez zen askoz

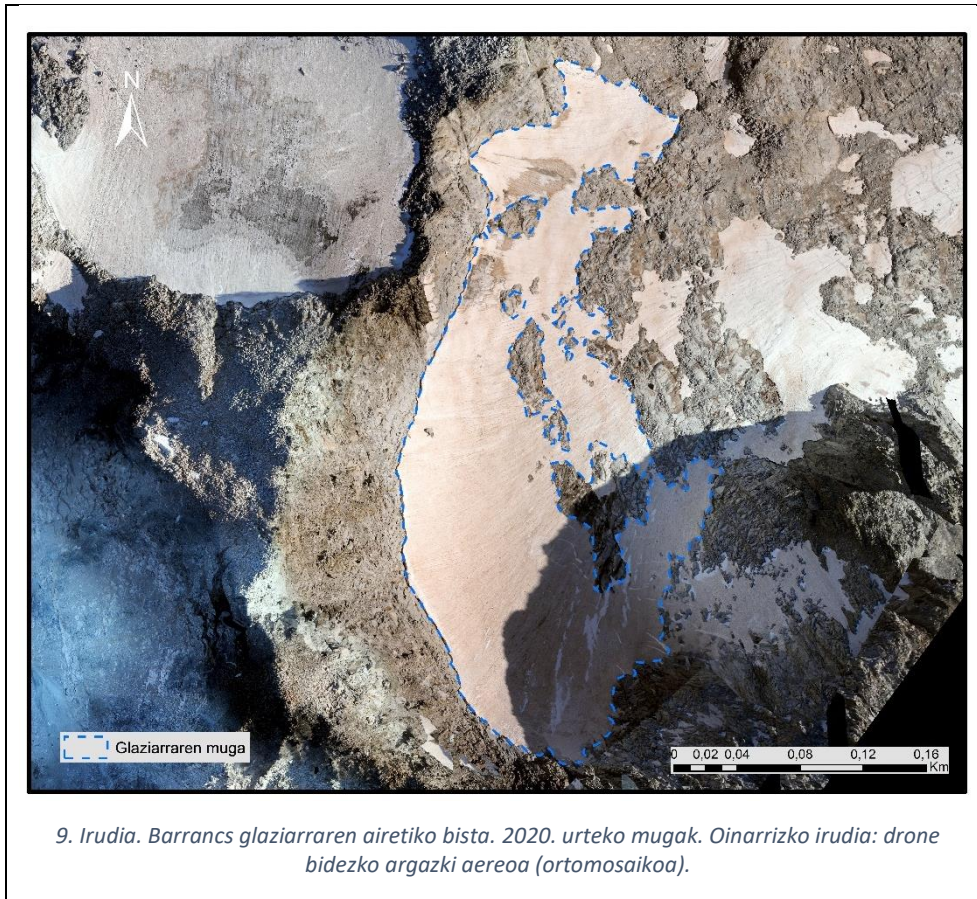
handiagoa. Llardana glaziarraren kasuan, 9,9 ha zituen 21. mendearen hasieran, egungo azalera 7,7 ha-tara murriztu delarik, %22,2 alegia. 2000. urtean 0,3 ha higakinez estalita zituen bitartean, % 13 inguruko hazkundera jasan du estalki honek eta 1 ha baino pixka bat gehiago estaltzen du orain (8. Irudia). Llardanak ez bezala, La Paul glaziarrak ez zeukan higakin-estalkirik, baina honen agerpen ez oso esanguratsu bat eman da, egungo azaleraren %4,82 estaliz. Bere azalerari dagokionez, honek bai 11,4 ha zituen duela bi hamarkada, orain aldiz 8,4 ha ditu, Llardana baino handiagoa izaten jarraituz. Bi hauek alderatzen jarraituz, La Paulen emandako guztizko azaleraren galera handiagoa izan da, %27,2-ko murrizketa batekin.



Perdiguero mazizoan beste hiru glaziar ditugu, hirurak 10 ha baino gutxiagorekin. Hauen artean handiena Seil de la Baque da, 2000. urtean 10 ha baino gehiagoko azalera zeukana, 13,8 zehazki, baina %38 galdu ostean 8,4 ha-ko azalera dauka gaur egun. Urte hauetan zehar higakin-estalkia agertu dela ikus daiteke, nahiz eta azalera txikia estali (0,7 ha inguru), baina kontuan izanda inolako estalkirik ez zeukala. Berdina gertatzen da

Portillonon kasuan, non, higakin-estalkirik ez izatetik, glaziarraren 0,4 ha estalita izatera pasa den, azalera osoaren %13 inguru. Glaziar honen galera hiruren artean handiena izan da, %43,6 galdu baitu, 3,1 ha-tan geratuz. Boum glaziarrak ere ez zeukan higakin-estalkirik, baina honek berdin jarraitzen du 20 urte geroago. Gainera, glaziarraren azalera totala kontuan hartuta, Pirinioetako glaziar guztien artean gehien galdu duen bigarren glaziarra da, %60 azalera gutxiagorekin, bakarrik Les Neous glaziarrak gaindituta.

Azkenik, **Maladeta-Aneto** mazizoa dugu, non, bost glaziar ageri diren, tamaina handikoak oro har. Ipar-mendebaldetik hego-ekialdera jarraituz, lehenik Maladetakoa biak ditugu. Mendebaldekoa da txikiena, 6 ha inguruko azalerarekin, gutxi gorabehera laurdena galdu badu ere 20 urte hauetan. Mazizo honetako glaziarretan ikusiko dugun bezala, ez zen higakin-estalkirik ageri (edo gutxieneko estalki txiki bat), baina denboraldi honetan zerbait agertu edo hazi dira. Hauxe da hain zuzen ere estalki azalera gehien irabazi duena, izan ere, Maladeta Mendebaldekoak ez zeukan, eta egungo irudien arabera 1,5 ha inguruko azalera estaltzen du, hots, glaziarraren laurdena. Maladeta Ekialdekoaren kasuan, aurrekoa baino askoz handiagoa izanda, higakin-estalkiak 0,9 ha-ko azalera dauka besterik ez (glaziarraren guztizko azaleraren %4,25), baina glaziarraren galera askoz nabariagoa izan da (%39 inguru). Hurrengoa Aneto-ko glaziarra dugu, mendikate honetako glaziarrik handiena 47,3 ha-ko hedadurarekin, azkeneko bi hamarkada hauetan %36,2 galdu badu ere. Honen higakin-estalkia ez da esanguratsua, lehen ez baitzeukan, eta egungoak glaziarraren %1,42 baino ez baitu estaltzen. Barrancs glaziarrak ere ez zuen higakin-estalkirik aurkezten, eta berdin jarraitzen du gaur egun (9. Irudia), bere azalera totalaren galera handienetarikoa izan den bitartean, %56,6, bere egungo 4,6 ha-tan geratuz. Hauekin bukatzeko, Tempestades glaziarrak ere galera nabaria jasan du, %36koa, hasiera batean Barrancs-en tamaina ia berdina bazuen ere. Honen kasuan 0,4 ha-ko higakin-estalkia ikus dezakegu, glaziarraren %5 inguru estaliz.



Valier mazizoaren kasua ere aipatu beharra dago, guztien artean ekialdeeneko puntuan kokatzen dena, eta beste guztiekiko kontrako joera aurkezten duena. Taulan ikus daitekeen moduan, 20 urte hauetan azalera mantendu duen glaziar bakarra dugu hau, mendikateko salbuespen bakarra izanda. Bere geomorfologia eta egituraren berezitasunak direla eta, neguan elur-jausien bidezko ekarpena eta udan eguzki irradiazioarekiko babesa ematen dio bere zirkuak, gainmetaketa glaziar bat izanda (René, P., 2021). Tokiko berezitasun hauek ez dira emaitza eta ondorio globalen testuinguruan kontuan hartuko.

5. EZTABAIDA

Behin emaitza guztiak aurkeztuta, hauek esan nahi dutena aztertzen zentratuko gara hurrengo atal honetan. Datuak era absolutuan eta erlatiboan eman diren heinean, emaitza ezberdinen arteko erlazioak ulertzeko erabiliko dira, eta parametro ezberdinen proportzioek bereziki lagunduko gaituzte ondorioak ateratzen. Hori dela eta, eztabaida gehien bat hasieran aipatutako hirugarren helburu horretan zentratuko dela esan dezakegu, bigarrenarekin batera, izan ere **higakin-estalkien arteko aldeak** ezagutzean datza eztabaida, hauen **kausa eta ondorioekin bat**. Gainera, emaitza hauen eztabaidan askotariko alderdiak hartu behar dira kontuan, datuen bilketa prozesuari dagozkionak alde batetik, eta emaitzen interpretazioaren inguruan eragina izan ditzaketenak bestetik, azkeneko hauek glaziarren eta inguruaren ezaugarriei lotutakoak.

Hasteko, landutako arlo honetan diren **hutsune** nagusiak oinarritzat erabiltzen diren irudien tratamenduan aurkitzen dira, hau da, teledetekzioak aurkezten dituen limitazioek ikerketa hauek baldintzatu eta mugatu ditzakete. Kontuan hartu beharreko gabezia horietako bat teledetekzioan glaziarren mugak zehaztea beti ez dela erraza da, askotan higakin-estalkiaren eta inguruko morrenen espektra oso antzekoa izan daitekeen heinean (Racoviteanu eta Williams, 2012). Oro har, eskala globalean esan daiteke aurrerapauso handia eman zela higakinez estalitako glaziarren distribuzioa ezagutzeko orduan, Randolph Glacier Inventory (Pfeffer et al., 2014; RGI Consortium, 2017) delakoaren eta honetan oinarritutako higakin-estalkien datuen bildumekin (Scherler et al., 2018; Herreid eta Pellicciotti, 2020). Satelite-irudien kalitatean hobekuntza nabariak eman dira bai espazio-bereizmen eta denbora-bereizmen aldetik, baita estaldura aldetik ere, baina aipatutako limitazioen harira, inbentario bat iturri desberdinez osatuta egoteak eskala txikiago batetan erabiltzeko orduan datuetan zehaztugabetasun edota akatsak aurkitzea ekar dezake. Eskualde baten eta bestearen arteko metodo aldaketak gerta daitezke, baita erabiltzailearen subjektibotasunaren menpeko eskuzko delineazio eta prozesaketak, edota geolokalizazio eta proiektzio erroreak ere (Racoviteanu et al., 2021), beste zenbait xehetasunekin batera, izaera honetako lanetan eragina dutenak.

Metodologia eta materialen atalean azaldutako moduan, iturri ezberdinak erabili izan ditugu oinarritzat, hauen gainean irudikapenak eta hauen emaitza eta ondorioak lortzeko,

izan ere, baiezza dezakegu RGI inbentario honetan oinarritutako higakinez estalitako izotz masen irudikapena ez dela nahiko sendo glaziar mota honen prozesu eta aldaketak ulertzeko. Higakin-estalkiak ageri diren eskualdeen eskala handiko mapa zehatzagoak beharrezkoak dira, eta honek agerian uzten du arlo honetan dauden hutsuneak (Racoviteanu et al., 2021). Gabezia hauek gure ikerketa eremuan badute nabarmendu beharreko alderdi bat, erresoluzioari dagokiona hain zuzen ere. 2000. urteko inbentario hau Landsat irudiak erabiliz egin zen mundu mailan dena homogeneousizatzeko asmoz, Pirinioetako glaziar txikietan arazoak aurki ditzakegularik 30 m-ko erresoluzioa dela eta, esate baterako, Andeetako glaziar handiagoeekin gertatzen ez den bezala. Hau guztia dela eta, azalera handiagoa duten glaziarren artean errazagoa izanen zaigu ondorioak ateratzea, eta eztabaida glaziar nagusi hauetan zentratzea komeniko zaigu, beste guztiak ere landuko baditugu ere. Azken finean, hemendik lortuko ditugu emaitza adierazgarrienak eta ondorio biribilenak, Aneto, Maladeta, Monte Perdido eta Ossoue glaziarretakoak batez ere. Dena den, esan bezala ez dira glaziar txikiak baztertuko, hauen arteko alderaketa asko eztabaidagarri direlako, bereziki mazizo berdinekoen artean ikusitako joeren antzekotasun eta ezberdintasunen kasuan.

Hain zuzen ere, eztabaidatzeko erabiliko ditugun konparaketa hauek egiteko **erraztasun** asko eskaintzen ditu metodologia honek. Ikerketa honetan erabilitako materiala eta hau bisualizatu eta lantzeko baliabideei esker, modu azkar batean azter daitezke glaziar ezberdinak, batetik bestera aldatuz eta helburuari eutsiz. Hortaz, prozesu hauen abantailen artean praktikotasuna azpimarra dezakegu, oinarritzko eta erlatiboki arruntak diren eragiketa batzuekin burutu daitezkeelako, eta honekin emaitza fidagarriak lortu. Hauen fidagarritasuna erabilitako irudi eta inbentarioen menpe egonen da, aurretik aipatutako mugak existitzen direlako, baina emaitzen indargune gisa bitartekari eza aipa dezakegu, kalitate oneko irudi baten gainean irizpide ahalik eta zuzenena aplikatuz lortutako datuez ari baikara. Mazizo eta glaziar guztietan irudi mota eta lan egiteko modu berdinak erabili ez badira ere (egon daitezkeen muga edo oztopo zehatz batzuen ondorioz), emaitza nahiko uniformeak lortu ahal izan dira, ordena geografiko zehatzik gabe eztabaidatuko direnak, hauen esangura eta eztabaidatzeko funtsa lehenetsiz.

Gavarnie-Monte Perdido mazizoaren kasuan, Monte Perdido Beheko glaziarra handienetarikoa bada ere, beste hirurak ez dira 10 ha-tara iristen, eta lauren artean bakarrik batek ez du higakin-estalkirik (Monte Perdido Goikoa), **arroka sedimentarioen**

nagusitasunak higakin hauen presentzia errazten baitu. Aldiz, hauek guztiek erlatiboki azalera nahiko gutxi galdu dute eskualde honetako gainerakoekin alderatuz. Horretarako, batezbesteko datuei erreparatuko diegu, eta hemen ikusiko dugu batezbestekotik beherako galerak izan dituztela laurdek, izan ere, glaziar guztietako datuak kontuan izanda batezbesteko %33,69-ko azaleraren galera kalkulatu dugu, Gavarnie-Monte Perdido mazizokoen artean soilik Taillon gerturatzen delarik (%31,29-ko galera). Hauen artean azalera gutxien galdu duena Gabietous da, %13,68, eta proportzionalki bere azaleraren zati handiena estalita duena da, bere higakin-estalkiak %23,49 hartuz. Bi glaziar hauek antzeko ezaugarriak dituzte, bata bestearengandik nahiko gertu daude, mazizo berean, iparraldera orientaturik, baina, esan bezala, Taillon-ek Gabietous-en bikoitza baino gehiago murriztu da. Ezberdintasun bakarra inguruko babesean dago, alde batetik, Gabietous zokoratuago dagoela esan daiteke, sakonago, eta horma bertikalagoez inguratuta, eguzkiaren irradiatutik babestuagoa alegia. Dena den, diferentzia hau ez da handiegia, eta bi hauen joera ezberdinen atzean egon daitekeen beste faktore bat higakin-estalkiena dugu, Taillon-en kasuan glaziarraren azaleraren %20 inguru suposatzen duena, Gabietous baino gutxiago. Horrelako portaera aurkezten duten glaziar gehiago ditugu, **higakin-estalkiek urtze prozesuetan duten eragin** posiblea azaleratuz.

Horrela, Maladeta-Aneto mazizoan ikus ditzakegun emaitzen arabera, higakin-estalkien agerpena ez da funtsezkoa, Maladeta Mendebaldeko glaziarraren kasuan izan ezik. Honetan, gaur egungo azaleraren laurdena dago higakinez estalita, baina duela bi hamarkada ez zegoen inolako higakin-estalkirik, eta berdina gertatzen zen beste lauretan, Tempestades-en izan ezik azaleraren %1 baino ez estalita zuelarik. Maladeta Mendebaldeko salbuespen horrez gain, ia ez da estalki hauen inguruko aldaketarik egon azkeneko bi hamarkadetan emaitzetan ikusi dugun bezala, izan ere, nagusiki granitoz osatutako mazizo batez ari gara, higakinen agerpena asko mugatzen duena. **Higakinen agerpen urri honekin batera lau glaziar hauen azalera galera nabarmena antzeman daiteke**, guztietan batezbestekoaren gainetik. Hauen artean, Barrancs glaziarrak murrizketa handiena jasan du (Pirinioetako glaziar guztien artean gehien murriztu den hirugarrena) bere azaleraren erdia baino gehiago galduz, eta honek ez du higakin-estalkirik. Azaleraren galera hau Maladeta Mendebaldekoarekin alderatzen badugu bereziki deigarria da, aurrekoak %26 baino gutxiago galdu baitu, mazizo honetako batezbestekotik nahiko urrun geratuz, eta hasieran esan bezala, %25-eko higakin-estalki batekin.

Mazizo honetako eta Pirinio guztietako glaziar handien kasuak ez dira oso ezberdinak. Anetoko glaziarrari erreparatuz, mendikate honetako glaziarrak handiena, joera berdina aurkezten duela esan daiteke, batezbestekotik gorako azalera galera, %1 inguruko higakin-estalki oso murriztuta batekin. Baita hurrengo handiena ere, Maladeta Ekialdekoa, Aneto-ren azalera murrizketa ia berdinarekin (%38 ingurukoa) eta ia higakin-estalkirik gabe, glaziarraren %4,25 baino ez, oraingoan higakin hauen babes eza agerian utziz. Joera hau aurretik aipatutako Barrancs eta Tempestades glaziarren kasuan ere antzeman daiteke, berriz ere ezaugarri oso antzekoak dituzten bi glaziar, bata bestearen jarraian, ipar-ekialdeko orientazioa, morfologia parekoa, eta 2000. urtean hedadura ia-ia berdinarekin ere, 10,6 eta 10,8 ha hurrenez hurren. Hala eta guztiz ere, Barrancs glaziarrak inolako estaldurarik gabe %57 inguru galdu duen bitartean, Tempestades-en emandako azaleraren galera %32 ingurukoa izan da, honen zati bat higakinez estalita egonda, gutxi bada ere (%5), hauen egungo azalaren arteko aldea asko hazi delarik.

Eztabaidatu beharreko beste kasu bat Pirinioetako mendebaldean dugu, Balaitous mazizoan hain zuzen ere Les Neous glaziarra, eta Picos del Infiernoko Erdiko Infiernos glaziarraren kasuek emaitza interesgarriak utzi dizkigute eta. Alde batetik, Pirinioetako **glaziar guztien artean azalera gehien galdu duena Les Neous da, higakin-estalkirik gabekoa**, eta egungo izotz masarik txikienetakoa daukana. Bestalde, Erdiko Infiernos glaziarrak azalera gutxien galdu duen horien artean dago (guztien artean hirugarrena), eta bere higakin-estalkiak glaziarraren %35,38 estaltzen du, proportzionalki estalkirik handiena Muniakoaren ostean. Konparaketa osatzeko, jakin beharra dugu biak altitude ia berdinean kokatzen direla, eta Les Neous-ek ekialdeko orientazioa daukala, Erdiko Infiernos-ena iparraldekoa den bitartean. Bien arteko alde nagusia higakinen aportazioan aurkitzen da, esan bezala, haien arteko aldea oso handia baita, gutxien eta gehien estaliak izanda, eta **faktore honek azken 20 urte hauetako bilakaeran eragin nabarmena izan duela erakusten du**, beste mazizoetan igarritako moduan. Kontuan hartu beharra dago, ikerketa eremuan azaldu den bezala, Balaitous mazizoa gorputz granitikoa dela, eta honen hauskortasuna txikia dela higakin-estalki hipotetiko bati sedimentuak aportatzeko, Infiernoko mazizoaren izaera metamorfikoaren aldean. Halaber, Erdiko Infiernos ez da bakarrik erlatiboki higakin-estalkirik zabalenetakoa duena, estalkiaren hedapen ohargarriena jasan duena ere baizik, Muniako glaziarrarekin batera.

Azkenengo honen kasuan, Muniako mazizoaren osaera sedimentario eta metamorfikoaren nagusitasuna dela eta, sedimentuen ekarpena nabaria da glaziarraren inguruan emaitzetan ikusitako moduan. Bere higakin-estalkiaren hazkundera azalera osoarekiko %46,24-koa izan da, eta honen eraginez zati proportzional handiena estalita duen glaziarra bihurtu da, bere azalera totalaren erdia higakinez estalita geratuz. Hau ez da Erdiko Infiernos-ekin amankomunean duen bakarra, azalera gutxien galdu dutenen talde horretan ere baitago, zehazki guztien artean gutxien murriztu dena izanda, %8,7-ko galerarekin baino ez. Honekin ikusten dugu bere **azaleraren proportzio handiena higakinez estalita duen glaziarra azken bi hamarkadetan azalera gutxien galdu duen glaziarra ere badela.**

Higakin-estalkien presentzia eta azalera galeraren erlazio honekin jarraituz, antzeko konparaketa batean zentratuko gara orain, berriz ere patroia berdina aurkezten duen kasu batekin. Les Neous glaziarrarekin gertatzen zen moduan, Vignemale mazizoan Ossoueko glaziarraren azaleraren galerak atentzioa deitzen du, eta eredu esanguratsuago bat dela esan daiteke, **glaziar handien emaitzak adierazgarriagoak izan ohi direla** kontuan hartuta. Hau da Monte Perdido Beheko glaziarrarekin parekatuta mendikate osoko hirugarren glaziarrik handiena, eta izatez, duela bi hamarkada bigarren handiena zen diferentzia handiz. Alde handia dago lehenengo egoera horretatik egungora, glaziar honek bere azaleraren %53,77 galdu du eta, gehien murriztu den horietako bat izanda. Beste behin ikus dezakegu glaziar honek higakin-estalkirik ez duela, ez orain ez 2000. urtean, eta lehenago (Les Neous glaziarreko kasua esate baterako) aurkeztutako bilakaera errepikatzen dela. Hau horrela izanda ere, mazizo honetako beste bi glaziarretan ez da gauza bera gertatzen, Petit Vignemale kasu, higakin-estalkirik gabe bere azalera proportzionalki askoz gutxiago murriztua ikusi izan duena, Ossouerekiko erlatiboki erdia. Gainera, Vignemaleko hirugarren glaziarrak, Oulettes de Gaubek, bere azaleraren herena hartzen duen higakin-estalki bat aurkezten du, azkeneko 20 urtetan %40 inguruko azaleraren galera pairatu duen bitartean. Argi dagoen moduan, **faktore ezberdinek eragiten dute urtze prozesu hauetan**, eta honetan kontuan hartu beharrekoa orientazioa eta inguruko egituren babesa aipatu beharra dago. Petit Vignemale glaziarra askoz txikiagoa da, eta eguzkiaren irradiaziotik babestuago dago ipar aurpegiko malkarren artean, Ossoue ekialdera orientaturik askoz ere babesgabetua egonda, kubeta formako arroan.

Posets mazizoko bi glaziarren (Llardana eta La Paul) artean agerian uzten da berriz ere aurretik azaltzen joan garen erlazio hau, izan ere, azaleren galerari eta higakinez estalitako proportzioari erreparatuz, **glaziar “txuriena” gehien murriztu dena izan da**, La Paul alegia. Honen estaldura Llardanakoaren herena da gutxi gorabehera, eta azalera totalaren galeran hainbesteko aldea ez badago ere, egoera antzekoa daukagu, aztertutako kasu gehienen joera jarraituz. Mazizo honetan ere bere ezaugarri litologiko eta higakinen presentziaren arteko lotura zuzena ematen da, ikerketa eremuaren atalean aipatutako material metamorfiko eta sedimentarioen hauskortasuna dela eta.

Azaleraren murrizketa handiago bat eman da Perdiguero mazizoan, bere hiru glaziarren kasuan, Boum-ekoa nabarmenduz. Honek azaleraren %60 baino gehiago galdu egin du, guztien artean gehien galdu duen bigarrena, eta mazizo honetan higakin-estalkirik ez duen bakarra. Beste biek, Sail de la Baquek eta Portillonek zati bat estalita badute ere, proportzionalki ez da estaldura handia ageri, eta galerak, aldiz, batezbestekoaren gainetik kokatzen dira, %38 eta %44 hurrenez hurren. Mazizo honetako jatorri igneoko arroken nagusitasuna dela eta, higakinen estaldura urria uler daiteke, arroka metamorfikoen presentzia ez baita handiegia. Kontuan hartu behar da ere bi hauek duela hogeituzetuz zutela inolako estalkirik, urte hauetan agertutako sedimentuez ari baikara, urtze prozesuetan eragin gutxiago izateko aukera izanda.

Oro har, sarreran aipatutako faktore topo-klimatikoaren inguruan gehiago eztabaida daitekeela esan dezakegu, eta ildo beretik jarraituta ikerketa-kasu anitz daude sakontzeke. Momentuz, autore batzuek zehaztutako moduan (Vidaller et al., 2021), **klimak kontrolatutako eta faktore topo-klimatikoek kontrolatutako glaziarren arteko bilakaeran ezberdintasun esanguratsuak** antzeman ditugu, hauetan emandako higakin-estalkien presentziari dagokionez. Glaziar handi nagusietan, non, klima oinarrizko baldintzatzailea den, orain arte azaldu bezala ez da orokorrean higakin-estalki nabarmenik agertu, Ossoue, Aneto edo Maladeta Ekialdekoaren kasuetan alegia, baita Monte Perdido Behekoan ere, estalki zerbait hedatuago batekin. Aldiz, faktore gehiagoren eraginpean dauden glaziar txikiagoetan higakinen presentzia gehiago antzeman da, estalkien agerpen deigarriago batekin, eta ikusteke dago bilakaera hau glaziar handienek jasanen duten edo ez, joera hau ikusita.

6. ONDORIOAK

Eztabaidatutako alderdi hauen inguruan esan daiteke badirela argirik ateratako gaiak, ondorio gisa uler daitezkeen zenbait gai, bai gure hipotesien baieztapen moduan, baita kontrako eran ere. Hauek guztiak azaldu nahi dira oraingoan, ikerketa honen ekarpenak plazaratzeko asmoz.

Honekin hasteko, orain arte garatutako lanaren helburuei eutsiko diegu hasieran aipatutako helburu nagusiari erreparatuz. Hori da hain zuzen ere aurreko ataletan zehar egiten aritu garena, eta lehen ondorio gisa esan dezakegu, emaitzetan ikusi dugunaren arabera mendikate honetako **higakin-estalkien presentzia areagotu dela 20 urteren kontuan**. 2000. urteko estalki guztien batura 2,2 ha-koa bazen, 2020. urtean osotara estalitako azalera 20,7 ha-tara iristen zen, Pirinioetako glaziarren higakin-estalkiak modu oso esanguratsu batean hedatu direla frogatuz. Gainera, glaziarren azalera totala murriztuz joan denez, higakin-estalkiek hartzen duten azalera proportzionalki are gehiago hazi da, hauen presentzia eta garrantzia nolabait biderkatuz. Zenbait autorek gertaera honen berri eman dute dagoeneko, hasierako ataletan azaldu dugun bezala, baina orain gure inguruko kasu hauetako datuekin ziurta dezakegu, mendikate honetan duela 20 urte higakinez estalitako glaziar baten azaleraren %4,17 hartzen zutelako batez beste, eta gure azkeneko emaitzen arabera zifra hori % 18,06-koa baita batez beste.

Ez da bakarrik glaziar mota hauen estalitako azalera datu absolutu eta erlatibotan handitu, izan ere, emaitzetan dagoeneko azaldu dugun moduan, **higakinez estalitako glaziarrak geroz eta gehiago dira**. Errealitate honen inguruan sarrerako atalean aipatu egin da faktore topo-klimatikoaren araberrako higakinen ekarpena aldatzen ari dela, eta honekin glaziar txuri batzuk arrokozko glaziar bihurtu daitezkeela. Momentuz, emaitza hauekin baieztatu dezakeguna da higakinez estalitako glaziarren kopurua Pirinioetan bikoiztu dela higakinen ekarpena areagotzean, hipotesi honen aldeko joera konfirmatuz.

Klimarekin erlazionatutako faktoreen eraginak ez du bakarrik higakin hauen ekarpenean eragiten, argi utzi dugu glaziarren bilakaeraren eragile nagusia dela, eta honekin klima aldaketak garrantzi handia hartzen du. Glaziarren azaleraren atzerapena ikusita, urte prozesuen azkartzea agerian geratu da beste behin ere, baina erritmo ezberdinak antzeman

ditugu mazizo eta glaziar bakoitzean. Hori dela eta, gure hurrengo helburu nagusiari helduta, glaziarren azaleraren galera eta higakin-estalkien presentziaren arteko erlazioaren nondik norakoak ulertzen saiatu gara, hurrengo ondorioekin. Eztabaidaren atalean komentatutako zenbait kasutan **bi parametro hauek bat zetozela ikusi dugu**, horrela izan da azalera asko galdu duten higakin-estalkirik gabeko glaziarren kasuan, Les Neous, Ossoue, Boum eta Barrancs bezala. Hauen artean emaitza adierazgarriena Ossoue glaziarrarena izanda, mendikateko glaziar nagusienetarikoa baita, eta horrelakoetan ondorioztatutakoak fidagarritasun handiagoa izan ohi du eta.

Hauez gain, **higakinez estalitako azalera erlatiboki handia duten eta azalera gutxi galdu duten** kasuek ere ondorio adierazgarriak ekarri dizkigute, besteak beste, Munia eta Maladeta Mendebaldeko glaziarrak. Muniako glaziarraren kasua deigarriena izanda, erlazio hau neurri txikiago batean azaleratzen duten glaziar gehiago eztabaidatu izan ditugu, baina beste asko tarteko puntu batean aurkitzen direla esan dezakegu. Bada, estaldura eta azalaren galeran batezbesteko parametroen artean mugitzen diren glaziar anitz daude, beste faktore batzuen eraginak garrantzi handiagoa hartuz. Eztabaidatutako beste alderdien artean mazizo bakoitzaren litologia ere izan da, glaziarren gaineko higakinen ekarpena honen menpeko kontua da eta. Honen harira, mazizoaren osaerak eta glaziarraren zaurgarritasun mailak bere inguruko egituren babesei dagokionez, **hauen bilakaeran ere zerikusia dutela ondoriozta dezakegu**. Ezaugarri hauek zein puntutaraino diren erabakigarriak oraindik ikertzeke dago, ez baitugu gai honetan hainbeste sakondu.

Glaziar bakoitzaren higakin-estalkiaren itxura, banaketa edota osaera ere kontuan hartu behar dugu bere bilakaera aztertzeke orduan, izan ere, higakin hauek ez dira beti modu berean ageri, eta honek glaziarrari babes gehiago edo gutxiago ematea suposatzen du. Honen adibide gisa Gabietous eta Maladeta Mendebaldeko glaziarrarena dugu, biek azaleraren laurdena inguru dute higakinez estalita, baina lehenengoak bestearen erdia galdu gutxi gorabehera. Dagoeneko aipatu dugu Gabietous glaziarraren inguruko orografiak babesten duela, baina bere higakin-estalkiaren garrantzia ere aipatu behar dugu kasu honetan. Maladeta Mendebaldekoaren kasuan estalkia zati bat baino gehiagotan agertzen den bitartean, Gabietousen kasuan erabat uniformeki ageri da, bere ablazio zonaren zati handi bat estaliz. Honek esan nahi du **masa galera eman ohi den beheko**

zonalde horretan higakinen geruza jarrai bat izateak galera hori moteltzen duela, Maladetan sakabanatuago egonda.

Oro har, higakin-estalkien babesaren hipotesia betetzen dela ondoriozta dezakegu orain arte aipatutako adibideekin, baina egia da glaziar handi eta nagusi batzuen kasuan erlazio hori ez dela hain argi ikusten, eta ezin ditugula emaitza hain adierazgarriak lortu hauengandik. Aneto, Maladeta Ekialdekoa edo Monte Perdido Beheko glaziarren kasua dugu hau, esan bezala, estaldura erlatiboki txiki batekin azalaren galera adigarria eman baita. Berriz ere aipatu beharra dago hauen zaurgarritasuna ez dela beti berdina, kokapena, orientazioa edota ingurua kontuan hartzen badugu. Hortaz, **azalera handiko glaziarretan higakin-esalkiak hainbesteko eragina ez duela** esan dezakegu, estaldura modu bateratu, jarrai eta zonalde gakoetan ematen ez denean behintzat. Hau horrela izanda ere, esan bezala badira beste zenbait glaziar azalera txikiagoa izanda bilakaera esanguratsua aurkezten dutenak, eta higakin-estalkiaren aipatutako baldintza optimo horiekin azalaren galera mugatu izana diruditenak, Llardana bezala, eta beste gutxi batzuk joera hau modu ez hain argi batean aurkezten dutena, Portillon bezala. Azkeneko honekin batera, La Paul, Seil de la Baque edo Tempestades bezalako glaziarrek ez dizkigute datu eztabaidaekin eskaini, edo beste modu batera esanda, joera anitz eta ezberdinak aurkezten dituzte, ondorio sendo bat edo beste ateratzeko nahikoa izan gabe.

Honekin bukatzeko, gure **hipotesi nagusiak ongi bideratuta** daudela esan dezakegu, alde batetik, higakin-estalkien presentzia modu argi batean hazi delako, eta hauek Pirinioetako glaziarren bilakaeran geroz eta garrantzi gehiago dutela frogatu dugulako, eta bestalde, garrantzi honetan datzan masa galera eta estalkien arteko erlazioa agerian geratu delako. Dagoeneko azaldu dugun moduan, erlazio honen nondik norakoak askoz gehiago iker daitezke, izan ere, baliteke aztertutako kasuak aski ez izatea erabateko ziurtasunez hipotesia konfirmatzeko, baina bai antzemandako joera hau errealitate bat dela eta ildo hau jarraitutako beste ikerketa-kasu zehatzekin bat egiten duela baieztatzeko. Zalantza gabe adieraz dezakegu higakin-estalkien presentzia geroz eta hedatuagoa izanen dela gure inguruko glaziar hauetan, eta baita hauen azalera murrizten jarraituko dela ere erritmo antzeko batean hurrengo hamarkadetan, batez ere klima aldaketaren testuinguruan ematen ari den galera hauen azkartzea kontuan hartuta. Hori dela eta, gai honen inguruan ikertzen jarraitzeko etorkizun oparoko aukera zabal ugari egon daitezke, eta etortzeke dauden emaitza horiek kontuan hartzekoak izanen dira.

7. BIBLIOGRAFIA

- Amblar-Francés, M.P., Ramos-Calzado, P., Sanchis-Lladó, J., Hernanz-Lázaro, A., Peral-García, M.C., Navascués, B., Domínguez-Alonso, M., Pastor-Saavedra, M.A., Rodríguez-Camino, E. (2020). High resolution climate change projections for the Pyrenees region. *Advances in Science and Research*, **17**, 191-208. <https://doi.org/10.5194/asr-17-191-2020>
- Anderson, R.S., Anderson, L.S., Armstrong, W.H., Rossi, M.W., Crump, S.E. (2018). Glaciation of alpine valleys: The galcier – debris-covered glacier – rock glacier continuum. *Geomorphology*, **311**, 127-142. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.03.015>
- Brook, M.S., Hagg, W., Winkler S. (2013). Debris cover and surface melt at a temperate maritime alpine glacier: Franz Josef Glacier, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, **56**, 27-38. <http://dx.doi.org/10.1080/00288306.2012.736391>
- Cuchí, J.A., Cancar-Pomar, L., del Valle-Melendo, J., Lampre-Vitaller, F., Fernández-Jarne, G. (2017). Evolución reciente del Glaciar del Infierno. *Lucas Mallada*, **19**, 323-340. <http://revistas.iea.es/index.php/LUMALL>
- del Barrio, G., Creus, J., Puigdefabregas, J. (1990): Thermal Seasonality of the High Mountain Belts of the Pyrenees. *Mountain Research and Development*. **10**, 227–233. <https://doi.org/10.2307/3673602>
- Fleischer, F., Otto, J-C., Junker, R.R., Hölbling, D. (2020). Evolution of debris cover on glaciers of the Eastern Alps, Austria, between 1996 and 2015. <https://doi.org/10.1002/esp.5065>
- García-Ruiz, J.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I., Lorente, A., Seeger, M. (2001). Los recursos hídricos superficiales del Pirineo aragonés y su evolución reciente. *Geoforma Ediciones, Logroño*, **192**.
- García-Ruiz, J.M., Martí-Bono, C., Peña-Monné, J.L. et al. (2013). Glacial and fluvial deposits in the Aragón Valley, Central-Western Pyrenees: chronology of the Pyrenean Late Pleistocene glaciers. *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography*, **95**, 15–32. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2012.00478.x>

- García-Ruiz, J.M., Palacios, D., Andrés, N., López-Moreno, J.I. (2020). Neoglaciation in the Spanish Pyrenees: a multiproxy challenge. *Mediterranean Geoscience Reviews*. <https://doi.org/10.1007/s42990-020-00022-9>
- Gibbons, W. eta Moreno, T. (2002). The geology of Spain. *The Geological Society, London*, 649.
- Gibson, M.J., Glasser, N.F., Quincey, D.J., Rowan, A.V., Irvine-Fynn, T.D. (2016). Changes in glacier surface cover on Baltoro glacier, Karakoram, north Pakistan, 2001-2012. *Journal of Maps*, **13** (2), 100-108. <http://dx.doi.org/10.1080/17445647.2016.1264319>
- Herreid, S. eta Pellicciotti, F. (2020). The state of rock debris covering Earth's glaciers. *Nature Geoscience*, **13**, 621–627, <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0615-0>
- Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussaillant, I., Brun, F., Kääh, A. (2021). Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, **592**, 726–731. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>
- IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Kirkbride, M.P. (2011). Debris-Covered Glaciers. In: Singh, V.P., Singh, P. and Haritashya, U.K. *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers*. Springer Netherlands, Dordrecht, 180–182. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2_622
- Knight, J. and Harrison, S. (2014). Mountain glacial and paraglacial environments under global climate change: Lessons from the past, future directions and policy implications. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, **96**, 245–264. <https://doi.org/10.1111/geoa.12051>
- Lewis, C.J., McDonald, E.V., Sancho, C. et al. (2009). Climatic implications of correlated Upper Pleistocene glacial and fluvial deposits on the Cinca and Gállego Rivers (NE Spain) based on OSL dating and soil stratigraphy. *Global Planet Change*, **67**, 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2009.01.001>

- López-Moreno, J.I., Alonso-González, E., Montserrat, O., Del Río, L.M., Otero, J., Lapazarán, J., Luzi, G., Dematteis, N., Serreta, A., Rico, I., Serrano-Cañadas, E., Bartolomé, M., Moreno, A., Buisan, S., Revuelto, J. (2019). Ground-based remote-sensing techniques for diagnosis of the current state and recent evolution of the Monte Perdido Glacier, Spanish Pyrenees. *Journal of Glaciology*, **65** (249), 85-100. <https://doi.org/10.1017/jog.2018.96>
- Martínez de Pisón, E. (1990). Morfoestructuras del Valle de Benasque (Pirineo Aragonés). *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, **10**, 121-147.
- Miles, K. E., Hubbard, B., Irvine-Fynn, T.D.L., Miles, E.S., Quincey, D.J., Rowan, A.V. (2020). Hydrology of debris-covered glaciers in High Mountain Asia. *Earth-Science Reviews* 207. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103212>
- Nicholson, L. eta Benn, D.I. (2006). Calculating ice melt beneath a debris layer using meteorological data. *Journal of Glaciology*, 52(178), 463–470. <https://doi.org/10.3189/172756506781828584>
- Nicolás-Martínez, P.M. (2013). Morfología del circo de Tucarroya (Macizo de Monte Perdido, Pirineo Aragonés). *Geographical Research Letters*, 7. <https://doi.org/10.18172/cig.884>
- Østrem, G. (1959). Ice melting under a thin layer of moraine, and the existence of ice cores in moraine ridges. *Geografiska Annaler*, **41** (4), 228–230. <https://doi.org/10.1080/20014422.1959.11907953>
- Pfeffer, W.T., Arendt, A.A., Aas, A.A., et al. (2014). The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers. *Journal of Glaciology*, **60**. <https://doi.org/10.3189/2014JoG13J176>
- Racoviteanu, A.E. eta Williams, M.W. (2012). Decision tree and texture analysis for mapping debris-covered glaciers: a case study from Kangchenjunga, eastern Himalaya. *Remote Sensing Special Issue*, **4**, 3078–3109. <https://doi.org/10.3390/rs4103078>
- Racoviteanu, A.E., Nicholson, L., Glasser, N.F., Miles, E., Harrison, S., Reynolds, J.M. (2021) Debris-covered glacier systems and associated glacial lake outburst flood hazards: challenges and prospects. *Journal of the Geological Society*. <https://doi.org/10.1144/jgs2021-084>
- RGI Consortium. (2017). Randolph Glacier Inventory: A dataset of global glacier outlines, Version 6. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. <https://doi.org/10.7265/4m1f-gd79>

- Rico, I., Izagirre, E., Serrano, E., López-Moreno, J.I. (2017). Current glacier area in the Pyrenees: an updated assessment 2016. *Pirineos. Revista de Ecología de Montaña*, **172**. <http://dx.doi.org/10.3989/Pirineos.2017.172004>
- Ríos Aragüés, L.M., Galera Fernández, J.M., Baretino Fraile, D. (1989). Mapa Geológico de España 1:50.000, Hoja nº 146 - Bujaruelo . ITGE, 65, Madrid. (+ 1 mapa a 1:50.000).
- Robador, A., Samsó, J.M., Pujalte, V., Oliva, B., Gil, I., Soto, R., Payros, A., Rosales, I., Tosquella Angrill, J. (2010). Cartografía Geológica a Escala 1:25.000 del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido y su Aplicación a la Gestión e Interpretación del Medio Natural del Parque Nacional. En *Proyectos de Investigación en Parques Nacionales: 2006-2009*, L. Ramírez, B. Asensio (eds.), Ministerio de Medio Ambiente - OAPN, Madrid, pp. 7-28.
- Sancho, C., Arenas, C., Pardo, G. et al. (2018). Glaciolacustrine deposits formed in an ice dammed tributary valley in the south-central Pyrenees: new evidence for late Pleistocene climate. *Sedimentary Geology*, **366**, 47–66. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.01.008>
- Scherler, D., Wulf, H., & Gorelick, N. (2018.) Global Assessment of Supraglacial Debris-Cover Extents. *Geophysical Research Letters*, **45**, 11,798–11,805. <https://doi.org/10.1029/2018GL080158>
- Schofield, N., Stevenson, C., Mark N., Holford, S. (2020). Igneous intrusions: Sills, Dykes and Plutons. *Encyclopedia of Geology*, **2**, 313-329. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00112-0>
- Serrano, E., Agudo, C., González-Trueba, J.J. (2002). La deglaciación de la alta montaña. Morfología, evolución y fases morfogenéticas glaciares en el macizo del Posets (Pirineo Aragonés). *Rev. C. & G.*, **16** (1-4), 111-126.
- Serrano, E., González Trueba, J.J., Sanjosé, J.J. (2011). Dinámica, evolución y estructura de los glaciares rocosos de los Pirineos. *Geographical Research Letters*, **37** (2), 145-170.
- Solomina, O.N., Bradley, R.S., Jomelli, V., Geirsdottir, A., Kaufman, D.S., Koch, J., et al. (2016). Glacier fluctuations during the past 2000 years. *Quaternary Science Reviews*, **149**, 61–90. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.04.008>

- V. Bosch, G., Teixell, A., Jolivet, M., Labaume, P., Stockli, D., Domènech, M., Monié, P. (2016). Timing of Eocene-Miocene thrust activity in the Western Axial Zone and Chaînons Béarnais (west-central Pyrenees) revealed by multi-method thermochronology. *Comptes Rendus Geoscience*, **348** (3-4), 246-256. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2016.01.001>
- Ventura-Roca, J. (2020). Distribución espacial y temporal de glaciares, glaciares cubiertos y glaciares rocosos durante la última deglaciación en el valle de la Bonaigua (Pirineo Central). *Geographical Research Letters*, **46** (2), 413-446. <http://doi.org/10.18172/cig.4395>
- Vidaller, I., Revuelto, J., Izagirre, E., Rojas-Heredia, F., Alonso-González, E., Gascoin, S., René, P., Berthier, E., Rico, I., Moreno, A., Serrano, E., Serreta, A., López-Moreno, J.I. (2021). Toward an Ice-Free Mountain Range: Demise of Pyrenean Glaciers During 2011-2020. *Geophysical Research Letters*, **48**. <https://doi.org/10.1029/2021GL094339>
- Zemp, M., Frey, H., Gärtner-Roer, I., Nussbaumer, S.U., Hoelzle, M., Paul, F., et al. (2015). Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century. *Journal of Glaciology*, **61** (228), 745–762. <https://doi.org/10.3189/2015JoG15J017>