



# Canvis globals i canvi climàtic

**Valentí TURU i MICHELS**



**Resum:** L'estudi dels registres sedimentaris continentals ha portat els científics a diferents debats i teories sobre l'origen dels vestigis glacials. Posteriorment l'estudi dels sediments marins ha permès entreveure que les variacions en el clima esdevingudes en el quaternari i que han format importants glaciacions han estat conseqüència de forçaments climàtics o canvis globals en el clima, amb la qual cosa s'imposa la teoria orbital de Milancovitch. Recentment, l'estudi de la composició de l'atmosfera antiga a partir de testimonis de glaç de l'Antàrtida (Vostok) i de Groenlàndia (GRIP) han permès posar de manifest ciclicitats d'ordre inferior als forçaments orbitals (forçaments suborbitals) que encara són subjecte de debat pel que fa a les causes (esdeveniments Heinrich, cicles Bond, cicles de Dansgaard-Oeschger). És conegut que canvis climàtics freds s'han esdevingut en períodes històrics (Dark Ages, Litle Ice Age) i prehistòrics relacionats amb cicles d'emissió d'armades d'icebergs a l'Atlàntic nord amb conseqüències a tot el planeta (cicles Bond). Si hom recopila totes les dades existents de paleoincendis esdevinguts a Andorra (datació  $^{14}\text{C}$  de carboni) s'observa que els cicles Bond coincideixen amb mínims de paleoincendis, mentre que els màxims períodes amb paleoincendis estan correlacionats amb màxims d'intensitat solar. Tot i haver-hi una certa gestió del medi per part de l'home prehistòric amb l'ús del foc (Riera & Turu, 2011), efectuant un anàlisi de probabilitat de Bayes la incidència antròpica no sobrepassa el 20%, i la resta és per causes naturals. Aquesta major o menor activitat solar podria estar en relació amb el moviment inercial del Sol, igual que els períodes d'òptims climàtics; el proper s'espera a l'interval 2242 dC-2610 dC, que, sumat a l'efecte generat pels gasos d'efecte hivernacle (canvi climàtic), pot derivar en un superinterglacial (Imbrie i Imbrie, 1994).

**Paraules clau:** canvi climàtic, Solar Inertial Motion, Heinrich Events, mínim de Maunder, Valira-Andorra, darrer cicle glacial

## I. A tall d'introducció

La natura ha estat sempre font d'inspiració de contes i llegendes però també protagonista d'importants controvèrsies científiques. A la primera meitat del segle XIX feia temps que era conegut que grans extensions de l'Europa del nord estaven recobertes de dipòsits caòtics alineats on habitualment podien observar clasts esfèrics i subsfèrics, sovint de litologies al·lòctones. L'explicació d'aquestes evidències i altres de relacionades van assentar les bases de la teoria del diluvi universal, no obstant el suport de la teoria en els escrits del Gènesi fou ràpidament abandonada el 1820 per una extensió de la mateixa teoria a diferents moments de la història de la Terra. Les troballes de fauna àrtica en regions actualment temperades i les exploracions polars van posar límits a la teoria diluvial per passar a la teoria de la deriva d'icebergs, en la qual masses de glaç s'havien desplaçat des de les regions polars i transportaven blocs i material al·lòcton fins al lloc de les evidències per mitjà de grans inundacions. En aquells temps es calculava la inundació a partir de l'alçada de les estries dels blocs erràtics, fins que el 1837 Louis Agassiz (1807-1873) va presentar per primer cop la seva teoria glacial a la Societat Suïssa de Ciències Naturals i la publicà el 1840. A partir de llavors, tant dil·luvionistes com els partidaris de la teoria glacial recopilaren arreu proves per donar suport a llurs teories, però lentament les evidències foren cada cop més evidents i s'acceptà la teoria glacial de forma gradual, a Suïssa (1844), a Anglaterra (1863), Alemanya (1875) i Nord-amèrica (1867). Però la conversió a la teoria glacial no fou mai completa fins ben entrat el segle XX.

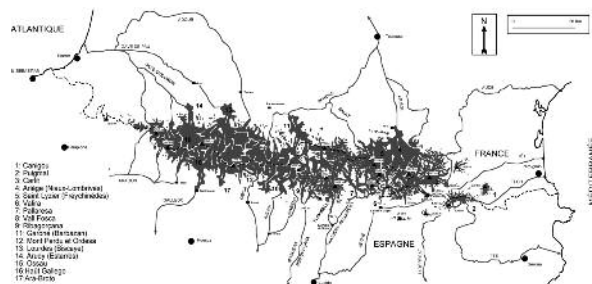
A prop nostre, diversos investigadors i viatgers francesos fan inventari de vestigis geològics tant des de la perspectiva dil·luvial com glacial (per exemple, Durocher, 1841; Chapentier, 1841; Dupont, 1844; Bladé, 1875), però no és fins al 1883 que l'obra d'Albrecht Penck *Die Eiszeit in der Pyrenäen* (El període glacial als Pirineus) marcarà un abans i un després en el coneixement del glacialisme als Pirineus.

## II. Les oscil·lacions climàtiques

Als Alps, Penck i Brückner



Figura 1. Extensió de les glaceres a partir del treball de síntesi efectuat per Penck (1883). Conclou que la major extensió de les geleres del vessant nord dels Pirineus respecte a les del sud fou degut a una causa climàtica i no a l'estructura dels Pirineus. La irradiació solar en el vessant nord és menor que en el vessant sud. En la figura inferior la cartografia de l'extensió de les glaceres, suposadament del darrer cicle glacial, segons Calvet (2004)



(1909) determinen, a partir de la relació entre els complexos morènics terminals i les terrasses fluvials, quatre cicles glacials que seguint el nom de quatre afluents del Danubi passen a ser nomenats Würm (fa 20.000 anys o 0,02 Ma), Riss (0,2 Ma), Mindel (0,58 Ma) i Gunz (1,1 Ma) per ordre d'antigor. A aquests s'hi afegirien més tard la glaciació Donau (1,8 Ma) i la Biber (2,5 Ma), per Eberl (1930) i Schaefer (1956), mentre que Schreiner i Ebel (1981) van intercalar entre el Mindel i el Gunz una nova glaciació, la Haslach (també nom d'un afluent del Danubi). Entre glaciacions hi hauria els respectius períodes interglacials (Donau/Biber, Biber/Gunz, Gunz/Haslach, Haslach/Mindel, Mindel/Riss i Riss/Würm), en un dels quals ens trobem avui dia i que anomenem Holocè (fa 10.000 anys fins a l'actualitat).

El registre geològic també evidencia èpoques glacials molt antigues i deixa empremtes en el cenozoic (era glacial holàrtic-antàrtic), iniciada fa 30 Ma a l'Antàrtida; en el paleozoic (era glacial entre el carbonífer i el permia; glaciació entre l'ordovicià i el silurià), i en el precambrià. És conegut que la darrera gran era glacial va coincidir amb la col·lisió d'Euramèrica i Gondwana per formar posteriorment un únic continent a la Terra (Pangea), que amplificava així els efectes continentals del clima i formava una glaciació a Gondwana situada al pol sud. Una causa similar és invocada en la formació de la glaciació de l'ordovicià-silurià, moment en el qual s'uneixen dos continents per formar Gondwana a prop del pol sud. Les glaciacions en el període criogeni (precambrià) es formaren en un moment en què els continents es trobaven a prop del pol sud i finalitzaren amb una deriva molt ràpida dels continents cap a l'equador. L'era glacial a l'inici del proterozoic únicament ha estat reconeguda a l'escut cratònic de Nord-amèrica i Canadà, mentre que la resta es van estendre per la major part dels actuals continents.

Veient aquesta evolució del clima en el decurs dels temps geològics hom pot pensar que la ciclicitat és el resultat d'interaccions entre forçaments externs, retroalimentacions i factors

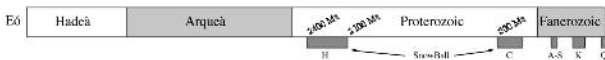


Figura 2. Eres glacials en la història de la Terra. Q = quaternari, K = karoo; A-S = andí-Sàhara; C = criogeni i H = huronià. Es pensa que en les dues primeres eres glacials la Terra va quedar totalment coberta de glaç en haver-hi presència de dipòsits glacials en latituds tropicals (snowball)

moderadors, on la freqüència (f) del fenomen que produeix el forçament extern determina el període climàtic (T) en un cicle climàtic (C). Podria expressar-se com:  $T = C / f$

En aquest sentit, un forçament de baixa freqüència (p. e., cicles de milions d'anys com la deriva continental) marca el clima en un llarg període de temps, com és el cas de la tendència del clima des de fa 55 Ma, mentre que al contrari (p. e., cicles de desenes d'anys, les taques solars) marquen el clima en un període de temps curt. La ciclicitat dels períodes glacials (G) es podria escriure com un moviment oscil·latori de major o menor amplitud (A) en funció del període (T) en el qual es trobi:  $G = A \sin (2\pi t/T) (1)$

### III. El darrer cicle glacial: màxima extensió, estabilització i desglaçament

Actualment és conegut que les variacions en el clima afecten directament al balanç de massa

de les geleres, ja que així s'ha pogut comprovar a les actuals geleres dels Pirineus i dels Alps a partir de documents antics (gravats, fotografies, descripcions) i de l'estudi geomorfològic (p. e. Copons i Bordonau, 1994). El mateix va succeir en la darrera glaciació a partir dels 20.000 anys després que els casquets de l'hemisferi nord arribessin a la màxima extensió (*Last Global Maximum*, LGM). No obstant, les geleres de vall com les dels Pirineus, en ser més sensibles a les fluctuacions climàtiques per la seva menor massa (menor inèrcia), registraren importants variacions dels fronts glacials ja a partir dels 35.000 anys (35 Ka). Recentment hi ha hagut força avenços en el coneixement de la cronologia de l'enllaçament als Pirineus en relació amb el darrer cicle glacial. Al sector oriental de la serralada, diverses valls a la Cerdanya disposen d'una cronologia detallada en aquest sentit (Delmas 2009), mentre que al sector occidental dels Pirineus, l'alta vall del Gállego (Osca) presenta també múltiples datacions que encara no han estat sintetitzades en conjunt (Peña *et al.*, 2004). La vall del Valira també presenta un bon nombre de datacions que, sintetitzades, permeten reconstruir les oscil·lacions climàtiques esdevingudes en el darrer cicle glacial (Turu *et al.*, 2017).

### **III.1. Cronologia del darrer cicle glacial a la vall de la Valira del Nord**

Nombrosos són els articles publicats sobre el glacialisme de les valls de la Valira del Nord, on la qualitat dels sediments que hi han estat dipositats permeten efectuar una reconstrucció detallada. Turu (2002a i b; Turu *et al.*, 2017) exposa amb austeritat de datacions (LM1, LM2 i LM4, figura 3), fent ús de l'anàlisi seqüencial, que l'estadi de màxim enllaçament és anterior a l'LGM (figura 4). Ampliant l'estudi de Turu (2002a i b) a tota la Valira del Nord i afegint noves datacions és possible disposar d'un gràfic de les fluctuacions glacials d'aquesta vall i relacionar-les amb esdeveniments climàtics coneguts, vegeu figura 3.

En aquesta figura s'ha representat el darrer cicle glacial a la Valira del Nord, el Würm alpi, subdividit segons Renault-Miskovsky (1992), en Würm I o *antic* (> 35 Ka), el Würm II o *recent* (35 Ka BP - 18 Ka BP) i tardoglacial, que segons aquest autor terminaria als 8,2 Ka BP), moment en el qual a la Valira del Nord hi ha una multiplicació dels incendis forestals (Turu *et al.*; 1995). A la figura 3 els noms en vertical representen cossos sedimentaris representatius de la Valira del Nord segons les descripcions de Turu i Bordonau (1997), Turu (2001, 2002a i b) i Turu *et al.* (2002), alguns dels quals hom ha pogut datar-los directament o indirectament a la vall principal de la Valira (Turu 1994; Turu *et al.* 2007; Jalut & Turu 2007) i relacionar l'etapa de màxim enllaçament amb les terrasses fluvials del Segre-Valira (SV-T4, Turu & Peña 2006a i b). Diversos episodis glacials reconeguts a l'hemisferi nord, com l'LGM, han quedat registrats en els sediments de la vall de la Valira del Nord. També s'han situat a l'esmentada figura els events Heinrich, moments en els quals es produeix a l'hemisferi nord l'emissió d'importants *armades* d'icebergs des del mantell laurentià cap a l'est en un curt lapse de temps (< 1 Ka), fet que si s'hagués conegut hauria estat el deliri dels defensors de la teoria de la deriva d'icebergs del segle XIX. Aquests icebergs en fondre haurien canviat la concentració salina de l'Atlàntic nord disminuint la seva densitat en superfície, debilitant la convecció amb l'aigua profunda; aquest es veuria compensat pel moviment des de l'Antàrtica d'aigua profunda creuant l'Equador i produint un refredament gradual del clima (Broecker, 2005).

Les seqüències climàtiques han quedat registrades en ambdós hemisferis, que en el cas de la Valira del Nord els esdeveniments H1, H2 i H3 coincideixen amb notables avenços del front glacial, mentre que els efectes ha estat menors per als esdeveniments més antics (H4 i H5).

Un esdeveniment Heinrich tanca un cicle de refredament climàtic progressiu (cicle Bond) després del qual el sistema convectiu a l'Atlàntic nord es restableix de nou i la circulació termohalina intensifica el corrent del golf, fet que comporta una sobtada millora climàtica (Bond *et al.*, 1993). Aquests cicles de Bond presenten una periodicitat de 6-10 Ka, on oscil·len estadis (clima fred) i interestadis (clima suau) de 2-3 Ka (cicles de D-O de Dansgaard-Oeschger). En el decurs d'un cicle Bond els casquets glacials de l'Atlàntic nord haurien guanyat en massa (ja sigui d'aigua subglacial o gel) fins al punt que es tornen inestables i es produeix un esdeveniment Heinrich (importants masses de glaç envairen l'oceà Atlàntic).

Els interestadis i estadis tenen una especial empremta en el registre sedimentari de les valls de la Valira del Nord, la qual obturada per la vall principal (figura 5) registrava els canvis climàtics en forma de sistemes deltaics proglacials en els interestadis (figura 6) i en forma de morrenes basals (Till) en els estadis d'avançament glacial (figura 7). Aquesta dinàmica se segueix fins al tardiglacial, moment en el qual es registren els darrers estadis i interestadis glacials al llac de la Massana (Pomerià, Pre-Bölling i Dryas I). Amb l'arribada del Bölling es produeix un retrocés dels fronts glacials sense precedents, de forma que el següent estadi d'avenç glacial (Dryas II) els fronts glacials ja no aconsegueixen assolir les posicions anteriors. Amb el interestadial Alleröd els aparells glacials queden molt reduïts i tot just assoleixen els fons de vall amb el darrer estadal (el Dryas III o YD). De forma posterior les geleres queden confinades en els circs glacials fins a desaparèixer als Pirineus (Copons i Bordonau, 1994) poc després dels 10.000 anys.

### **III.2. Cronologia del darrer cicle glacial a les valls de Valira**

L'estudi geomecànic dels sediments presents al fons de la vall principal (Andorra la Vella) així com la prospecció geofísica del subsòl d'aquesta cubeta (Turu *et al.*, 2007) ha permès determinar que aquesta disposa d'un registre sedimentari de 120 m de gruix i que està estructurat en cinc seqüències estratigràfiques. Les primeres quatre seqüències estratigràfiques presenten sediments glacials (morrena de fons o till) i materials glaciofluvials-glaciolacustres, mentre que la més antiga i profunda correspon al darrer interglacial (eemià, estadi isotòpic marí 6). D'altra banda, l'estudi de les terrasses fluvials del sistema Segre-Valira (Turu & Peña, 2006b) ha permès situar l'extensió del front de la gelera de la Valira en els principals moments d'avenç glacial, però també ha permès identificar vestigis glacials relacionats amb glaciacions del pleistocè mitjà i inferior (el Riss alpi, estadi isotòpic marí 7 i possiblement el 21). Efectuant una síntesi de les dades sedimentàries de la Valira del Nord (figura 3) amb les de la vall principal, hom pot establir una cronologia absoluta del darrer cicle glacial a les valls de la Valira (figura 8).

A partir de la figura 8 és possible raonar per què la màxima extensió glacial a una latitud com la dels Pirineus fou anterior a la dels grans casquets glacials. L'LGM comença entre els 33 Ka

Figura 3. Fent ús de l'estratigrafia seqüencial (Turu 2002 a i b) i afegint les descripcions de Turu & Bordonau (1997) juntament amb les dades de prospecció geofísica del fons de vall d'Ordino i la Massana (Turu *et al.* 2002), ha estat possible calcular el volum de materials glaciofluvials i glaciolacustres entre episodis d'avenç glacial (Till 0 a Till 6). Cal tenir present que el volum de sediment dipositat en un determinat moment està en funció de la taxa de sedimentació, per tant aquest gràfic permet relacionar extensió glacial (en ordenades) versus temps registrat (en abscesses). S'han afegit datacions radiocarbòniques inèdites (anys BP no calibrats) efectuades en sediments de la Valira del Nord (β1777397; β203441; β203444; β203438) i a la Gran Valira (β185455; β203438; β202588 i β169808). També s'han afegit datacions inèdites per cosmogènics (<sup>21</sup>Ne i <sup>10</sup>Be) de superfícies de poliment glacial a Engolasters (AND 9), al Roc del Quer a Canillo (AND 6), Encodina al Serrat (AND 3) i al circ de la Coma del Forat d'Arcalis (AND 1)

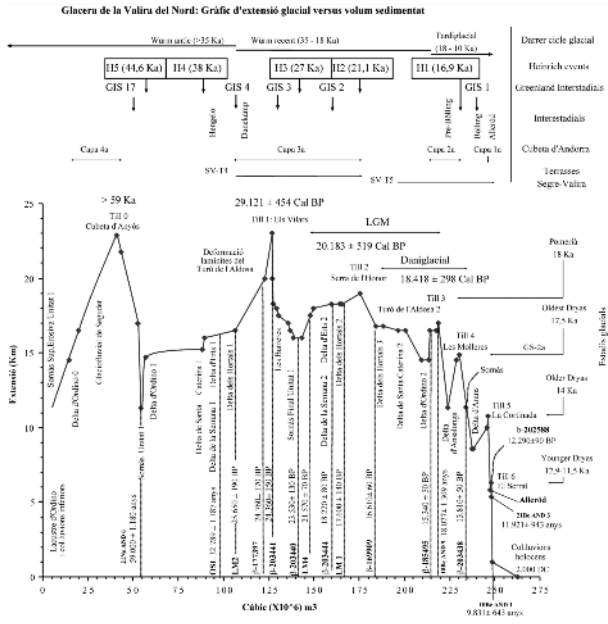
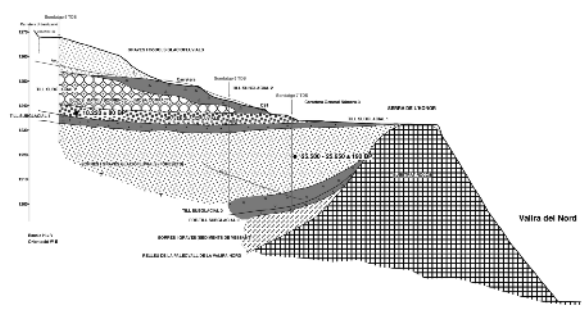


Figura 4. Secció interpretativa a l'oest de la Serra de l'Honor. Situació de les datacions en els sediments glaciofluvials anteriors al dipòsit del till 2 (18.220 ± 80 BP que correspon a una edat calibrada de 21.655 ± 515 anys Cal BP, β-203433) i anteriors al dipòsit del till 1 (25.545 ± 225 BP que correspon a una edat calibrada de 30.692 ± 381 anys Cal BP, LM 2). Els nivells de till situats per sota d'aquesta darrera datació (Till 0 i pre-Till 0) corresponen a pulsacions glacials anteriors. Els sediments situats per sobre del substrat rocós i per sota del pre-till 0 podrien correspondre al darrer interglacial. La calibració de les datacions més antigues de 20.000 anys BP (*before present*) s'ha efectuat a partir de Danzeglocke *et al.* (2007)



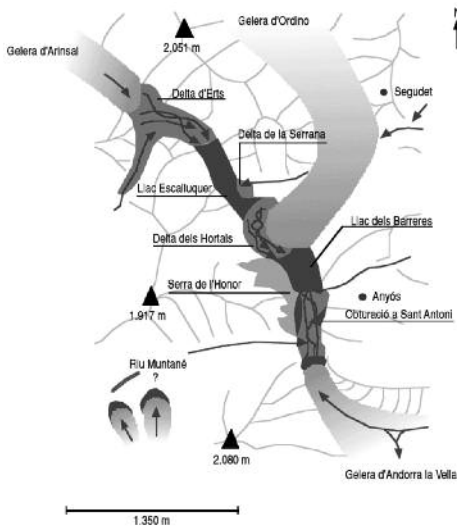


Figura 5. Posició dels fronts glacials durant la desglaciació. La gelera d'Andorra obtura la vall de la Valira del Nord i els fronts glacials tributaris aporten sediments als llacs. Aquestes geleres tributàries actuen com a sensors climàtics i els sediments lacustres són el seu registre. L'estudi estratigràfic detallat dels sediments lacustres i les seves implicacions climàtiques han permès l'elaboració de la figura 3

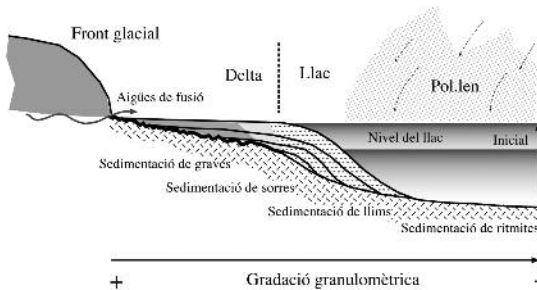


Figura 6. Figura idealitzada dels aports sedimentaris dels fronts glacials al marge del llac. S'hi ha representat una retrogradació deltaica per l'augment del nivell de l'aigua en el llac. Aquest augment es produeix per una més gran obturació de la gelera principal respecte a la vall tributària, mentre que en el cas contrari el llac es buidaria. Les variacions del nivell dels llacs juxtaglaciàls estan en funció de les fluctuacions glacials, per tant de les variacions climàtiques

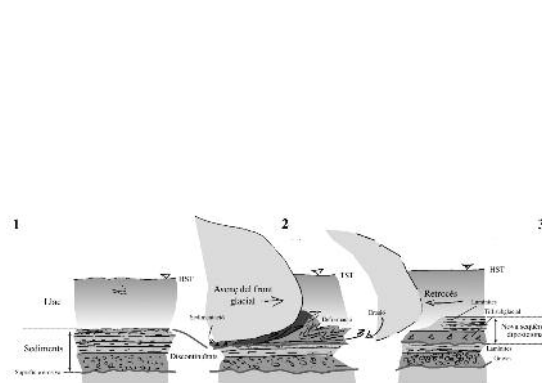
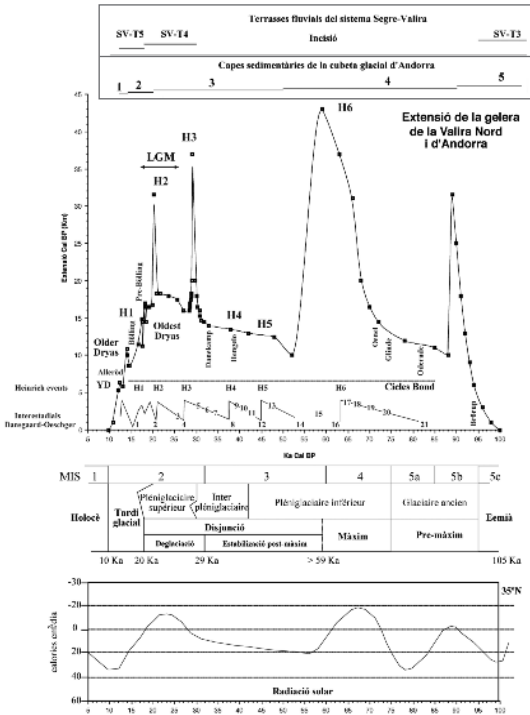


Figura 7. Efectes en la sedimentació d'un llac juxtaglaciàl de tipus pirinenc (poca profunditat i reduïdes dimensions) d'un avenç d'un front glacial. 1) Augment del nivell del llac per una obturació més gran de la gelera principal. 2) Avanç del front glacial tributari que erosiona i deforma parcialment els sediments anteriors. 3) Retrocés del front glacial tributari quan encara el llac continua estant obturat per la vall principal. En llacs més grans com els alpins la gelera entra en flotació i els indicis del seu avenç és la formació de deltes subglaciàls (progressió de les paraseqüències cap a conca) i la presència de material lític transportat per icebergs (*dropstones*)



Figura 8. Cronologia absoluta del darrer cicle glacial a les valls de la Valira incloses les terrasses fluvials Segre-Valira i les seqüències estratigràfiques de la cubeta glacial d'Andorra. Correlació amb els cicles de Bond (inclosos els esdeveniments Heinrich i els Dansgaard-Oeschger, segons Bond *et al.* 1993 i corregida a Cal BP segons Denton *et al.* 2005), els estadis isotòpics marins (MIS), la nomenclatura de les fases glacials en el continent europeu (en francès, segons Van Vliet-Lanoë, 2005) i una proposta per al glacialisme de les valls d'Andorra. Els mínims de radiació solar (extrapolada de Berger 1978 per una latitud de 35°N) coincideixen amb les principals fases d'avenç glacial. S'han situat els noms dels principals interestadials i estadials del tardiglacial, així com els esdeveniments Heinrich d'especial importància per a les valls de la Valira



- 26,5 Ka (primera meitat del MIS 2) amb el creixement dels casquets glacials fins que assoleixen els màxims creixements. El creixement dels mantells glacials coincideix amb un mínim de radiació solar en latituds elevades, mentre que al final de l'LGM la insolació canvia de tendència i augmenta. En l'LGM la gelera de la Valira del Nord avança però menys que en la fase de màxim enllaçament (figura 8) atès que aquí el mínim de radiació solar s'assoleix en el MIS 4 i no en el MIS 2. L'inici del MIS 3 coincideix amb un important retrocés de les llengües glacials, que en el cas de la gelera de la Valira del Nord el front glacial se situaria (com a mínim) per sobre de Sornàs (meitat superior de la unitat 1 de Turu, 1998). La fase d'estabilització postmàxim es caracteritza per una acumulació d'interestadials en el MIS 3 i les geleres es mantenen reduïdes en tot aquest període. El gruix de les geleres disminueix més d'un 20%, com és el cas de la gelera de la Valira d'Orient a Canillo, que es veu reduïda de més de 110 m; aquí el retrocés glacial deixarà lliures superfícies de poliment glacial (Roc del Quer) de 59 Ka d'antigor (superfícies datades per cosmogènics, mostra AND 6, figura 3), que permet situar l'inici del MIS 3 i el final del MIS 4 a les valls de la Valira. Tot i que les fases glacials posteriors assoleixen posicions del front glacial similars als de la màxima extensió glacial (vegeu Turu & Peña, 2006b), el volum d'aquestes no superaran el 80% del total assolit a la fase de màxima extensió glacial. Aquesta observació indica que en la fase de màxim



glacial (MIS 4) les geleres haurien presentat una important acumulació de glaç en capçalera (glaceres de base freda) mentre que a la fase de disjunció glacial (MIS 3 i MIS 2) les geleres de les valls de la Valira haurien protagonitzat avenços molt sobtats (*surge events*), fet que hauria permès guanyar posicions molt avançades sense disposar d'un important volum de glaç (glaceres de base temperada). De fet, és justament a partir del MIS 2 que les fases d'avenç glacial a les valls de la Valira coincideixen amb els esdeveniments Heinrich. Poc es coneix de la fase de premàxim glacial, però els registres sedimentaris Turu i Bordonau (1997) han permès evidenciar una obturació juxtaglacial prematura de la Valira del Nord (delta d'Ordino 0; figura 3) que se situaria cronològicament en l'estadi MIS 5a, però també a Sornàs (part inferior de la unitat 1 de Turu 1998) i a la serra de l'Honor (figura 4) la detecció de dos tills sobreposats (Till 0 i pre-Till 0) permeten saber de avenços glacials del MIS 4 (till 0) i anteriors (pretill 0, MIS 5b). Aquests dipòsits morrènics de fons se situen sobre uns sediments de vessant (MIS 5c) que fossilitzen el relleu d'una paleovall de la Valira del Nord (pre-MIS 5c). El principi del darrer cicle glacial està documentat per les datacions U/Th realitzades en el complex kàrstic de Niaux-Lombrive-Sabart, a prop de Tarascó de l'Arieja (Sorriaux, 1981; Bakalowicz et al., 1984), les quals han mostrat l'existència de dos episodis glacials que respectivament són de 270.000 a 185.000 anys (Riss) i de 90.000 a 20.000 anys (Würm).

#### **IV. Oscil·lacions de la radiació solar: anàlisi de la corba d'extensió glacial**

Com s'ha pogut veure, hi ha una poderosa correlació entre la radiació solar i les fases glacials per latituds com la dels Pirineus. Veient que hi ha ciclicitat de les fases d'avenç glacial hom pot reprendre la idea que les fases glacials es comporten com funcions sinusoidals (1). Segons aquest supòsit, hom pot efectuar una anàlisi harmònica o de Fourier d'aquesta funció sinusoidal (corba d'extensió glacial), fet que ens permetrà identificar de què està formada. Per a tal propòsit s'ha efectuat una regularització de les dades d'extensió glacial/temps per calcular la transformada ràpida de Fourier (FFT).

Un cop efectuada la transformada de Fourier (figura 9) el resultat de l'anàlisi espectral mostra pics en períodes ja reconeguts anteriorment (cicles Bond, esdeveniments Heinrich i interestadials de Dansgaard-Oeschger), els quals tenen a veure amb la dinàmica de la corrent de l'Atlàntic nord i del mantell glacial laurentià, però també d'altres que tenen a veure amb les variacions de la radiació solar per causes orbitals (inclosa la del quasicicle solar de 2,4 Ka) i que corresponen als cicles de Milankovitch (canvis en l'excentricitat de la òrbita planetària, canvis en l'eix d'inclinació de la Terra i precessió dels equinoccis). Tots aquests cicles interactuen entre ells i els efectes de cadascun se sumen o es resten depenent del moment del cicle, és a dir que els forçaments externs fan que el clima es comporti com la suma de funcions sinusoidals de diferent període i amplitud.

Els canvis en l'excentricitat de l'òrbita de la Terra, amb una periodicitat de 100 Ka, és el cicle que inicia o termina una època glacial. L'anàlisi de Fourier efectuada a la corba d'extensió glacial de les valls de la Valira és insuficient per mostrar la potència d'aquest pic associat als períodes de 100 Ka, no obstant sí que és present a la figura 9. Respecte a la resta de cicles orbitals el cicle d'obliquïtat (període de 41 Ka) domina a la figura 9 sobre el de la precessió dels equinoccis (període de 23 Ka) seguit del moviment inercial del solar respecte al baricentre

(període de 2,4 Ka i que aquí es presenta marcadament com de 2,9 Ka, fet que indica que té una part important d'harmònics). Els canvis del periheli (períodes de 19 Ka) també es veuen reflectits en l'anàlisi espectral juntament amb el seu semicicle (9,5 Ka).

Un canvi en la inclinació de l'eix de la Terra (l'obliquïtat) afecta de forma notable la insolació per latituds mitjanes i elevades, atès que l'angle d'incidència dels raigs solars és més elevat (insolació menor) quan l'eix de rotació de la Terra es troba més vertical (més perpendicular respecte a l'eclíptica o pla orbital). Aquest sembla el cas del registre analitzat, els Pirineus es troben a latitud mitjana i l'obliquïtat sembla que ha tingut un paper important en el patró de la darrera glaciació, però també els harmònics de les variacions inercials del Sol hi són presents. La precessió dels equinoccis segueix en rang per un increment de l'amplitud estacional (als 20 Ka els estius eren més suaus); tot i que afecta més en latituds subtropicals aquí resulta tenir també una certa empenta, igual que els cicles de semiprecessió (9,5) que tenen especial influència en latituds tropicals. Aquest darrer cicle se solapa amb la ciclicitat de Bond (entre 10 i 15 Ka), que també hi han de ser presents atès que s'han identificat les ciclicitats dels esdeveniments Heinrich (7 Ka) i de Dansgaard-Oeschger (1,45 Ka).

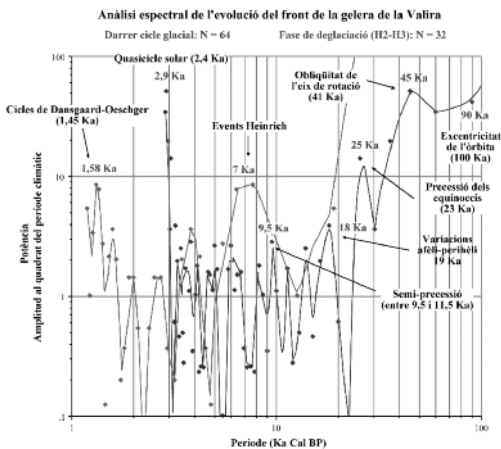


Figura 9. Anàlisi harmònica del registre d'englaçament de les valls de la Valira. Línia blava anàlisi de Fourier per a tot el cicle glacial, es distingeixen pics propers als períodes orbitals de Milancovitc (100 Ka, 41 Ka i 23 Ka; Hays et al. 1976), de la distància entre la Terra i el Sol (afeli-periheli, 19 Ka, Berger 1977), de semiprecessió (entre 9,5 Ka i 11,5 Ka) on en la mateixa franja estarien situats els cicles Bond (entre 10 i 15 Ka), i de l'activitat solar (2,4 Ka; Hood & Jirkowic, 1991). Línia vermella anàlisi de Fourier per la deglaciació (30 Ka i 19 Ka) on es distingeixen clarament pics propers als esdeveniments Heinrich (7 Ka) i de Dansgaard-Oeschger (1,45 Ka)

### V. Hi haurà propera glaciació? I un nou òptim climàtic holocè?

La teoria astronòmica del origen de les glaciacions (Milancovitc, 1957) proveeix una robusta base per a la predicció del curs del clima en el futur. Actualment, l'excentricitat de l'òrbita i l'obliquïtat es troben de forma que tendeixen a refredar el clima del futur mentre que la precessió tendeix a l'escalfament, però ja les primeres modelitzacions del clima del futur (Imbrie & Imbrie, 1980) mostren que la tendència preveu que la propera era glacial presenti un màxim avenç de les glaceres en uns 23.000 anys respecte d'avui dia. No obstant, la

tendència a llarg termini previsible a partir de la teoria orbital també serà modificada per oscil·lacions d'alta freqüència, les quals han estat reconegudes en diferents moments de l'holocè (Wilson et al., 2000) i és previsible que també s'esdevinguin en un futur. La millor de les oscil·lacions coneguda de curta durada és la corresponent a la petita edat del gel (1350-1900 dC), moment en què es va produir la disminució de la temperatura mitjana d'1° C respecte a l'actual, fet que va provocar que les glaceres dels Pirineus, els Alps, Alaska, Lapònia i Nova Zelanda avançaren més enllà dels seus límits actuals, però també va afectar les collites de cereals (Mateo i Gómez-Ortiz, 2004). El pic d'extensió de les morrenes glacial fou a l'inici del XVIII (Denton i Karlén, 1973; Grove, 1988; Copons i Bordonau, 1994), moment en el qual la disminució de la insolació va ser de l'ordre de l'1% (Eddy, 1980) dins de l'anomenat *mínim de Maunder* (figura 10).

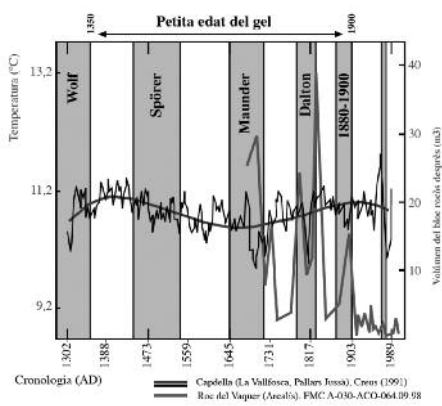


Figura 10: Representació de la Petita Edat del Gel (LIA o Little Ice Age) en base a les temperatures mitjes del mes de maig en Capdella (Vall Fosca, Pirineus Centrals), des de l'any 1302 dC. dins l'actualitat (1989) i que corresponen a estimacions dendrocronològiques (Creus 1991). Mitja mòbil d'onze anys i ajust polinòmic. Representació dels mínims d'activitat solar de Wolff (1280-1350), de Spörer (1450-1550), Maunder (1645-1720), Dalton (1795-1822) associats als diferents cicles d'activitat solar. Envoltent de desprendiments de blocs rocosos del vessant del Roc del Vaquer (2300 m) al final de la petita edat del gel i posteriorment, fent ús del mètode de datació lliquenomètric a la Coma d'Arcalís (Ordino). Els desprendiments rocosos s'accentuen per processos de gelifracció i l'efecte "falca de gel". Aquest efecte deuria ser més important durant els episodis de mínima radiació solar de Maunder i Dalton, generant desprendiments de major volum que els que puguin donar-se avui a la Coma d'Arcalís. (Dades inèdits Fundació Marcel Chevalier 1998 i 1999)

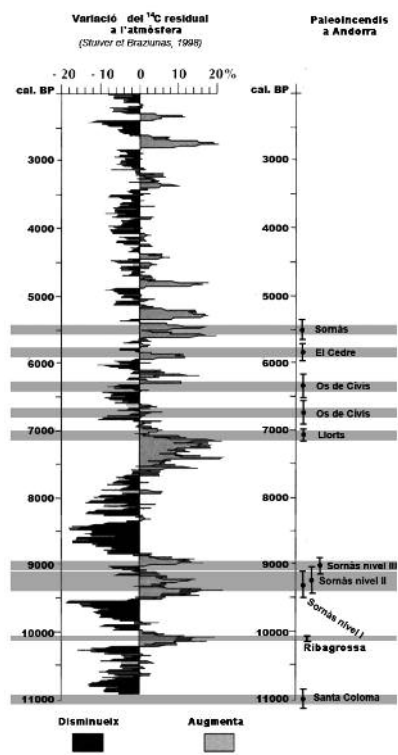


Figura 11: Recopilació de dades antracològiques publicades (Turu & Planas, 2005; Riera & Turu, 2011) i inèdites (Fundació Marcel Chevalier, 1996, 1999b, 2004, 2007) on s'observa una coincidència dels paleoincendis amb una major activitat solar

La petita edat del gel fou el darrer de cinc esdeveniments similars ocorreguts a l'holocè amb màximes extensions de les geleres als 2.800 anys BP, 5.300 anys BP, 8.000 anys BP i 10.500 anys BP que indica que una petita edat de gel de 2.500 anys està sobreimposada a les ciclicitats orbitals de molt més llarg període. De fet, a partir del registre de l'activitat de l'isòtop <sup>14</sup>C dels darrers 8.000 anys BP s'ha reconegut un quasicicle d'activitat solar de 2.402 anys (figura 11).

El registre sedimentari de les valls de la Valira mostra una variabilitat antracològica en funció dels canvis climàtics esdevinguts en l'holocè (figura 12). En aquesta figura s'observen una sèrie de pics de probabilitat d'ocurrència de paleoincendis entre *Bond events* i entre els estadials del Dryas al final del tardiglaciari. Cal destacar que els primers carbons apareixen de forma posterior a l'LGM glacera (Last Global Maximum) i els paleoincendis s'intensifiquen a l'interstadial Allerød (entre Dryas II i el Dryas III). Al principi de l'holocè se succeeixen una sèrie d'esdeveniments freds en un curt lapse temporal (Bond 8 a 6) que limita la proliferació dels incendis forestals, però a partir de l'esdeveniment Bond 6 fins al esdeveniment 8,2 Ka (Bond 5) es produeixen importants incendis a les masses forestals, concretament del Valira Nord (Turu et al. 1995). En aquest període temporal s'ha reconegut un augment de la temperatura al llac Redón (Pla & Catalan et al. 2005), els primers indicis de Cerealia i un augment de apophytes a la vall del Madriu (Ejarque, et al. 2011). Els efectes de l'esdeveniment fred 8,2 Ka es deixen notar fins al final del Epipaleolític; a la vall del Madriu es detecta una retracció de Corylus, Betula, Ulmus i una disminució de Pinus a l'estadi alpi i subalpi, interpretat per Ejarque (2011) com una disminució de la temperatura i augment de l'aridesa entre els 8,5 - 7,7 Cal BP. No és fins als alhors del neolític els paleoincendis s'intensifiquen de forma paral·lela a una certa recuperació dels caducifolis al Madriu (Ejarque, 2011). De moment no sembla que hi hagi evidències palinològiques / paleoclimàtiques a la vall del Madriu que expliquin una

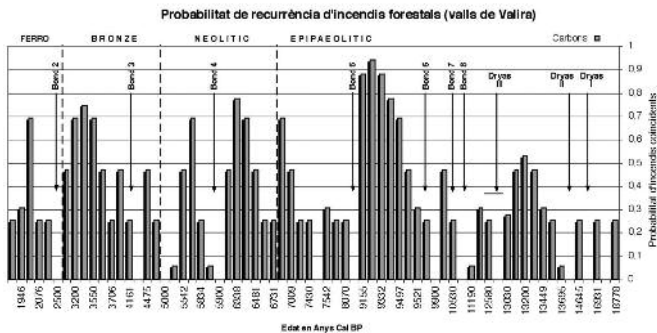
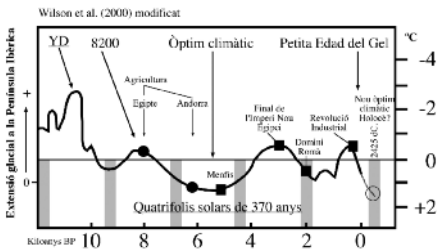


Figura 12: Recopilació de dades antracològiques de jaciments arqueològics (Balma de la Margineda y Juberrí), als quals s'ha assignat una mínima probabilitat d'ocurrència de paleoincendis (no descartable) en períodes d'ocupació humana (< 0,1). Recopilació de dades antracològiques de les prospeccions realitzades al Madriu, incloses les ocupacions documentades mitjançant radiocarboni (Miras et al. 2007; Ejarque, 2009). Altres dades antracològiques publicades (Turu & Planas, 2005) i inèdites (Fundació Marcel Chevalier, 1996, 1999b, 2004, 2007)

menor freqüència de paleoincendis a l'inici del neolític, potser el registre sedimentari analitzat és encara una mica incomplet per aquesta època, tot i això l'esdeveniment Bond 4 subdivideix de manera clara el període neolític, sent el primer període (el més antic) més intens que el posterior (figura 12). La disminució dels paleoincendis al final del neolític coincideix amb la retracció d'Abies, Corylus i Betula a les valls del Madriu (Ejarque, 2011). Igual que en el neolític al Bronze es pot subdividir en dues fases (figura 12), separades per un esdeveniment climàtic global (l'esdeveniment 4,2 Ka, Bond 3), després del qual s'inicia una marcada expansió de Cerealia-t i de apophytes al Madriu (Ejarque, 2011). L'edat del Ferro s'inicia amb el Bond event 2 (figura 12) i en els Pirineus centrals es caracteritza per una baixada de les temperatures (Pla & Catalan, 2005).

Tornant als efectes astronòmics del clima, el moviment inercial del Sol (SIM) al voltant del centre de massa del sistema solar (baricentre) és el fenomen central del sistema solar causat per les posicions variables dels planetes (predominantment els planetes gegants, de més massa i més distants), i que sembla ser estacionari (Damon i Linick, 1986) al voltant d'un període de 2,4 Ka. És a dir que a banda de la rotació del Sol sobre si mateix aquest efectua trajectòries "balls" en trifoli dins d'un cercle de 0,02 UA de diàmetre (1 UA  $\approx$  1,5\*10<sup>8</sup> Km), uns regulars de 19,8 anys i d'altres irregulars de 178,7 anys de promig. Aquest és d'interval que separen mínims d'activitat (p.e. Wolf-Spörer = 160 anys; Spörer-Maunder = 190 anys; Maunder-Dalton = 167 anys), d'aquesta forma Charvatova (2000) demostra la relació mútua entre el moviment solar i l'activitat del mateix. En els darrers 8.000 anys el pas d'un trifoli regular a un irregular ha estat pertorbat diferents cops (p.e. entre 158 aC – 208 dC; 2561 aC – 2193 aC, 4964 aC – 4596 aC, 7366 aC i 6998 aC) essent reduït el trifoli irregular de 178,7 anys a 159 anys moment en el qual el Sol es va moure en un quatrifoli estable per 370 anys. Aquests segments excepcionals de 370 anys s'esdevenen cada 2402,2 anys i coincideixen amb òptims climàtics (figura 13).

Figura 13: Evolució de la temperatura mitja des del Younger Dryas (YD). Representació dels Quatrifolis Solars (espais en gris) de 370 anys de duració coincidint amb millores de la temperatura (Charvatova 2000), essent el proper esdeveniment orbital solar entre 2240-2610 dC. Han estat reconeguts diversos períodes freds a l'Holocè com els que van iniciar importants revolucions culturals (l'agricultura en l'episodi fred del 8200 i la revolució industrial al segle XIX després del mínim de Dalton) i la decadència d'imperis mil·lenaris com l'Egipci, tots ells apareixen en harmònics del cicle no regular dels Trifolis (múltiples de 178,7 any), concretament seguint els harmònics 14 (Petita Edat del Gel i període fred post òptim climàtic), 28 (extrems de l'òptim climàtic Holocè) i 42 (ciclicitat de 7,5 Ka similars als dels events Heinrich). L'estudi de la documentació històrica ha permès reconèixer l'existència d'aparells glacials fòssils a la Península Ibèrica al segle XII en zones tant meridionals com Serra Nevada (Gómez-Ortiz, 2005), fet que permet situar en el gràfic un hipotètic zero d'extensió de les geleres a la Península i per extensió als Pirineus. Actualment a Andorra existeixen geleres rocalloses al Grau-Roig amb gel fòssil, l'aigua de fusió del qual ha estat datat per <sup>14</sup>C (DIC) en més d'un miler d'anys (gelera rocallosa de la Portella de Joan Antoni, 1340  $\pm$  40 BP i 720  $\pm$  40 BP,  $\beta$ -251179 i  $\beta$ -251178), fet que mostra amb tota probabilitat que a la Petita Edat de Gel aquests circs foren ocupats per petits aparells glacials



El següent segment s'esdevindrà entre els anys 2242 dC i 2610 dC (Charvatova, 2000). Actualment (1985-2040) s'està en un "ball" de tipus desordenat (no trifoliar) i similar al de la segona meitat del segle XIX (Charvatova, 2000), per analogia s'esdevindran cicles solars majoritàriament dèbils i llargs, mentre que al 2085 dC el Sol tornarà a un moviment de trifoli orbital sortint de la seva mínima activitat. Finalment dir que els cicles orbitals de Milancovic també han estat reconeguts en sediments de roques del Carbonifer (fa uns 300 Ma) i que aquest forçament del clima sempre ha estat present, no així les glaciacions ja que els alts nivells de CO<sub>2</sub> presents a l'atmosfera en altres períodes geològics (p.e. a principis del Cenozoic) no permetien iniciar cap glaciació; així doncs els gasos emesos antròpicament a l'atmosfera juguen a favor de l'escalfament global que en combinació amb el proper cicle SIM (*Solar Inertial Motion*) quadrifoliar pot conduir cap a un nou òptim climàtic Holocè en els propers 400 anys.

**Valentí Turu i Michels,**

licenciat en geologia i membre del Patronat de la Fundació Privada Marcel Chevalier

(1) Fundació Marcel Chevalier, Av. Príncep Benlloch 66-72, AD 500 Andorra la Vella, Principat d'Andorra  
igeofundacio@andorra.ad

### **Bibliografia**

- BERGUER, A. L. (1978) Long-term variations of caloric insolation resulting from the Earth's orbital elements. *Quaternary Research* 9, 139-167.
- BAKALOWICZ, M.; SORRIAUX, P.; FORD, D. C. (1984) Quaternary glacial events in the Pyrenees from U. series dating of speleothems in the Niaux-Lombrives-sabart Caves, Ariège, France. *Norsk Geografisk Tidsskrift* 38, 193-197.
- BLADÉ, J. F. (1875) "Études géographiques sur la vallée d'Andorre" p. 97. (Universelle: Paris).
- BOND, G.; HEINRICH, H.; BOECKE, H.; LABEYRIE, I.; i col.laboradors (1993) Evidence for massive discharges of ice-bergs into the North Atlantic Ocean during the last glacial period. *Nature* 365, 143-147.
- BROECKER, W.S. (2005) "The role of the ocean in climate yesterday, today and tomorrow" p. 183 (Eldigio Press: Palisades, N.Y.).
- BROECKER W. S. (1987) "How to build a habitable planet". p. 291. (Eldigio Press: New York).
- CHARPENTIER, J. (1841) "Essai sur les anciens glaciers" p. 210 (Lausanne).
- CHARVATOVA, I. (2000) Can origin of the 2400-year cycle of solar activity be caused by solar inertial motion?. *Annales Geophysicae* 18, (4), p. 399-405.
- CALVET, M., (2004). The Quaternary glaciation of the Pyrenees. In: Ehlers, J., Gibbard, P. (Eds.), *Quaternary Glaciations—Extent and Chronology, Part I: Europe*. Elsevier, Amsterdam, p. 119–128.
- COPONS, R i BORDONAU, J. (1994) La pequeña efef del hielo en el macizo de la Maladeta (Alta cuenca del Esera, Pirineos Centrales); In: "El glaciario supienaisico: nuevas aportaciones". (ed. C. Martí-Bono i J.M. García-Ruiz) p. 111-124. (Geoforma Ediciones: Logroño).
- CREUS, J. (1991) Tendència secular de la temperatura de Mayo en el Pirineo Oriental. *Notes de Geografia Física* 20-21, 41-49.
- DANZEGLOCKE, U., JÖRIS, O., WENINGER, B., quickCalPal-2007online. <http://www.calpal-online.de>
- DAMON, P. E. i LINICK, T. W. (1986) Heliomagnetic modulation of atmospheric radiocarbon production. *Radiocarbon* 28, 266-278.
- DELMAS, M. (2009) "Chronologie et impact géomorphologique des glaciations quaternaires dans l'est des Pyrénées" p. 529. (Thèse de l'Université de Paris 1: Paris).
- DENTON, G. H.; ALLEY, R. B.; COME, G. C.; BROECKER, W. S. (2005) The role of seasonality in abrupt climate change. *Quaternary Science Reviews* 24, 1159–1182.

- DENTON, G. H. i KALÉN, W. (1973) Holocene climatic variations-their pattern and possible cause. *Quaternary Research* 3, 155-205.
- DUPONT, E. (1844) Sur divers phénomènes diluviens observés dans le département de l'Ariège et quelques vallées voisines. *Ann. Mines IV<sup>e</sup> série*, t. V, p. 481.
- DURROCHER (1843) Sur les traces de phénomènes diluviens qui s'observent dans les Pyrénées. *C.R. Acad. Sc.*, t. XIII, p. 92.
- EBERL, B. (1930) "Die Eiszeitenfolge im nördlichen Alpen-vorlande. -Ihr Ablauf, ihre Chronologie auf Grund der Aufnahmen des Lech- und Illergletschers" p. 427 (Benno Filser: Augsburg).
- EDDY, J. A. (1980) Climate and the role of the sun. *Journal of Interdisciplinary History* 10, 725-747.
- EJARQUE, A. (2009) Génesis y configuración microregional de un paisaje cultural pirenaico de alta montaña durante el holoceno: estudio polínico y de otros indicadores paleoambientales en el valle del Madriu-Perafita-Claror (Andorra). Tesis Doctoral, Universitat Rovira i Virgili, Tarragona (España), 348 p.
- FAIRBRIDGE, R.W. (1997) Orbital commensurability and resonance. In: "Encyclopedia of Planetary Sciences". (Eds. J.H. Shirley & Fairbridge, R.W.), p. 564-571. (Chapman & Hall: London).
- GÓMEZ-ORTIZ, A. (2005) El paisaje glaciar de Sierra Nevada: evolución del conocimiento, resultados recientes e investigaciones en curso en el Corral del Veleta. *Treballs de la Societat Catalana de Geografia* 59, 63-86.
- GOVE, J. M. (1988) "The Little Ice Age" p. 498. (Methuen: London).
- HAYS, J. D.; IMBRIE, J.; SHACKLETON, N. J. (1976) Variations in the earth's orbit: peccemaker of the ice ages. *Science* 194, 1121-1132.
- HOOD, L. L.; JIRIKOWIC, J. L. (1991) A probable 2400 year solar quasicycle in atmospheric delta 14C. *Holocene* 12, 98-105
- IMBRIE, J.; IMBRIE, J. Z. (1980) Modeling the climatic response to orbital variations. *Science* 207, 943-953.
- IMBRIE, J.; IMBRIE, J. Z. (1994) "Ice Ages solving the mystery". p.224. (Harvard University Press: London).
- JALUT, G.; TURU V. (2008) Le dernier cycle glaciaire-interglaciaire dans les Pyrénées: englacement, climat et végétation. In: «Pyrénées d'hier et d'aujourd'hui» p. 145-162 (Atlantica: Biarritz).  
<http://www.igeotest.fr/articles/docs/Article%20Pyrenees.pdf>
- MATEO, M.; GÓMEZ-ORTÍZ, A. (2004) La pequeña Edad del Hielo en Andorra: episodios morfogenéticos y su relación con la producción de cereales en Europa. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Sección Geología)* 90 (1-4), 173-183.
- MILANCOVIC, M. (1957) Astronomische Theorie der Klimaschwankungen ihr Werdegang und Widerhall. *Serbian Academy of Sciences (Monografic)* 280, 1-58.
- MIRAS, Y.; EJARQUE, A.; RIERA, S.; PALET, J. M.; ORENCO, H. A.; EUBA, I. (2007) Dynamique holocène de la végétation et occupation des Pyrénées andorranes depuis le Néolithique ancien, d'après l'analyse pollinique de la tourbière de Bosc dels Estanyons (2.180 m, Vall del Madriu, Andorre). *Comptes rendus Paleovol* 6, 291 – 300.
- PLA, S. & CATALAN, J. (2005) Chrysophyte cysts from lake sediments reveal the submillennial winter/spring climate variability in the northwestern Mediterranean region throughout the Holocene: *Climate Dynamics*, 24, 263-278.
- PENCK, A. (1883) Die Eiszeit in der Pyrenäen. *Mitteilungen des Vereins für Erdkunde*. 163-231. (Traducción francesa de Braemer 1885, L.: La période glaciaire dans les Pyrénées. *B.S.M.N.* XIX, 105-200.
- PENCK, A.; BRÜCKNER, E. (1909) *Die alpen im eiszeitalter*. p. 1199 (Chr. Herm Tauchnitz, Leipzig).
- PEÑA, J. L.; LEWIS, C.; McDONALD, E.; RHODES, E.; SANCHO, C. (2004) Ensayo cronológico del Pleistoceno medio-superior de la cuenca del río Cinca (Pirineos y Depresión del Ebro). In: "Contribuciones recientes sobre Geomorfología. *Actas VIII Reunión Nac. de Geomorfología. Toledo* " (ed. Benito, G. y Díez-Herrero) p. 165-172 (SEG y CSIC: Madrid).
- RENAULT-MISKOVSKY, J. (1992) Palynologie du Quaternaire européen: chronostratigraphie, paléoclimatologie et paléoenvironnement végétal de l'homme fossile. *Géochronique* 44: 21-24.
- RIERA, S. & TURU, V. (2011) Cambios en el paisaje del valle de Ordino al inicio del Holoceno: Evolución geomorfológica, paleovegetal e incendios de época Mesolítica (NW del Principado de Andorra, Pirineos Orientales). El quaternari a Espanya i àrees afins (Valentí Turu i Anna Constante, ed.), AEQUA-Fundació Marcel Chevalier, Andorra la Vella, 201-204  
[http://www.igeotest.es/Articles/docs/Paleoambient\\_Sornas.pdf](http://www.igeotest.es/Articles/docs/Paleoambient_Sornas.pdf)
- SCHAEFER, I. (1956) Sur la division du Quaternaire dans l'avant-pays des Alpes en Allemagne. 2, p. 910-914. (Actes IV Congrès INQUA: Roma/Pisa).
- SCHREINE, A. & EBEL, R. (1981) Quartärgeologische Untersuchungen in der Umgebung von Intersglazial-vorkommen im östlichen Rheingletschergebiet (Baden-Württemberg). *Geologisches Jahrbuch* A 59, 3-64.
- SORRIAUX, P. (1981) Etude et datation de remplissages karstiques : nouvelles données sur la paléogéographie quaternaire de la région de Tarascon (Pyrénées ariégeoises). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*. Paris, II, 293, 706-706.



- TURU, V. (1994) Datos para la determinación de la máxima extensión glaciar en los valles de Andorra (Pirineo Central). In: "Actas de la III Reunión Nacional de Geomorfología 1994" p. 266-273. (SEG: Logroño).
- TURU, V.; BORDONAU, J.; VILAPLANA, J. M. (1995) La sección de Sornàs (Andorra, Pirineo Central). In: "Actas de la III Reunión del Cuaternario Ibérico 1993" p. 209-213. (GTPEQ-SGP: Coimbra).
- TURU, V.; BORDONAU J. (1997) El glacialisme en les valls de la Valira del Nord, síntesi d'aforaments, *Annals de l'Institut d'Estudis Andorrans* (Centre de Barcelona) 1995, 41-104.
- TURU, V. (1998) Interpretación genética de la unidad deformada de la sección estratigráfica de Sornàs. Un drumlin en los valles de la Valira del Nord, Principado de Andorra, (Pirineos Orientales). In: "Investigaciones recientes de la Geomorfología española" (Ed. A. Gómez-Ortiz y F. Salvador Franch) p. 445-454. (SEG-UB: Barcelona).  
<http://www.igeotest.ad/articles/docs/Drumlin%20Sornas.pdf>
- TURU, V. (2000) Aplicación de diferentes técnicas geofísicas y geomecánicas para el diseño de una prospección hidrogeológica de la cubeta de Andorra, (Pirineo Oriental): Implicaciones paleohidrogeológicas en el contexto glaciar andorrano. In: "Jornadas sobre la actualidad de las técnicas geofísicas aplicadas en hidrogeología" p. 203-210. (IGME, Granada) [http://aguas.igme.es/igme/publica/libros2\\_TH/actu\\_tec\\_geofi/pdf/14a\\_comunicacion.pdf](http://aguas.igme.es/igme/publica/libros2_TH/actu_tec_geofi/pdf/14a_comunicacion.pdf)
- TURU, V. (2001) Ejemplos de deformación sinsedimentaria en la cubeta glaciolacustre de la Massana, Push Moraine de la Aldosa i delta dels Hortals, Principado de Andorra (Pirineos Orientales). In: "Actas V Reunión del Cuaternario Ibérico" p. 81-84. (GTPEQ-SGP: Lisboa) <http://www.igeotest.ad/articles/docs/Push%20Moraine.pdf>
- TURU, V. (2002a) Análisis secuencial del delta de Erts. Estratigrafía de un valle glaciar obturado intermitentemente. relación con el último ciclo glaciar. Valle de Arinsal, Pirineos Orientales, parte I : El método utilizado". In: "Estudios recientes (2000-2002) en geomorfología, patrimonio, montaña y dinámica territorial" p. 555-563 (SEG-Departamento de Geografía UVA: Valladolid) <http://www.igeotest.ad/articles/docs/Delta%20Erts%20Part%201.pdf>
- TURU, V. (2002b) Análisis secuencial del delta de Erts. Estratigrafía de un valle glaciar obturado intermitentemente. relación con el último ciclo glaciar. Valle de Arinsal, Pirineos Orientales. Parte II : Aplicación. In: "Estudios recientes (2000-2002) en geomorfología, patrimonio, montaña y dinámica territorial" p. 565-574 (SEG-Departamento de Geografía UVA: Valladolid) <http://www.igeotest.ad/articles/docs/Delta%20Erts%20Part%202.pdf>
- TURU, V.; POUS, J.; BORDONAU, J.; PALOMAR, J. (2002) La cubeta de sobreexcavació glaciar de La Massana-Ordino, Pirineus Orientals: Aplicació de la prospecció geoelèctrica. *Horitzó* 2, 38-52.  
<http://www.iea.ad/crecit/imatges/massana.pdf>
- TURU, V. & PLANA, X. (2005) Inestabilidad de vertientes en los valles del Valira. Datos y dataciones para el establecimiento de una cronología, posibles causas. Andorra y Alt Urgell (Pirineos Orientales). VI SIMPOSIO NACIONAL SOBRE TALUDES Y LADERAS INESTABLES (J. Corominas, E. Alonso, M. Romana, M. Hürlimann, Eds.). Universidad Politécnica de Valencia-Universidad Politécnica de Catalunya. València. Vol. II, p. 792-805. <http://www.igeotest.ad/articles/docs/TuruiPlanas.pdf>
- TURU, V.; PEÑA, J.L. (2006a) Las terrazas fluviales del sistema Segre-Valira (Andorra-La Seu d'Urgell-Organyà, Pirineos Orientales): relación con el glacialismo y la tectónica activa. In: "Geomorfología y Territorio" (ed. A. Pérez-Alberti y J.López) p. 113-128 (Publicaciones de la Universidad de Santiago de Compostela, 171: Santiago de Compostela).  
<http://www.igeotest.ad/articles/docs/Turu%20Pena%20Segre-Valira%201.pdf>
- TURU, V.; PEÑA, J. L. (2006b) "Ensayo de reconstrucción cuaternaria de los valles del Segre y Valira (Andorra-La Seu d'Urgell-Organyà, Pirineos Orientales): morrenas y terrazas fluviales". In: "Geomorfología y Territorio" (Eds. A. Pérez-Alberti y J.López) p. 129-146 (Publicaciones de la Universidad de Santiago de Compostela, 171: Santiago de Compostela).  
<http://www.igeotest.ad/articles/docs/Turu%20Pena%20Segre-Valira%201.pdf>
- TURU, V.; BOULTON, G. S.; ROS, X.; PEÑA, J. L.; MARTI-BONO, C.; BORDONAU, J.; SERRANO-CAÑADAS, E.; SANCHO-MARCEAN, C.; CONSTANTE-ORRIOS, A.; POUS, J.; GONZALEZ-TRUEBA, J. J.; PALOMAR, J.; HERRERO, R.; GARCIA-RUIZ, J. M. (2007) Structure des grands bassins glaciaires dans le nord de la Péninsule Ibérique: comparaison entre les vallées d'Andorre (Pyrénées Orientales), du Gállego (Pyrénées Centrales) et du Trueba (Chaîne Cantabrique). *Quaternaire* 18, 309-325.  
<http://www.igeotest.fr/articles/docs/Quaternaire%2018.pdf>
- TURU, V.; CALVET, M.; BORDONAU, J.; GUNNELL, Y.; DELMAS, M.; VILAPLANA, J. M.; JALUT, G. (2017) Did Pyrenean glaciers dance to the beat of global climatic events? Evidence from the Würmian sequence stratigraphy of an ice-dammed palaeolake deponente in Andorra. *Geological Society, London, Special Publications* 433, 111-136.  
[http://www.igeotest.fr/Articles/docs/Turu%20et%20al%20\(2016\)%20SGL.pdf](http://www.igeotest.fr/Articles/docs/Turu%20et%20al%20(2016)%20SGL.pdf)
- VAN VLIET-LANOË, B. (2005) "La Planète des glaces, histoire et environnements de notre Ère glaciaire". p. 470 (Vuibert: Paris).
- WILSON, R. C. L.; DRURY, S. A.; CHAPMAN, J. L. (2000) "The great ice age. climate change and life" p. 267 (Routledge: London).