



UNIVERSITAT<sup>DE</sup>  
BARCELONA

# Reconstrucció climàtica dels darrers 2.700 anys a la Mediterrània occidental: sediments marins i estalagmites

Mercè Cisneros Bermejo



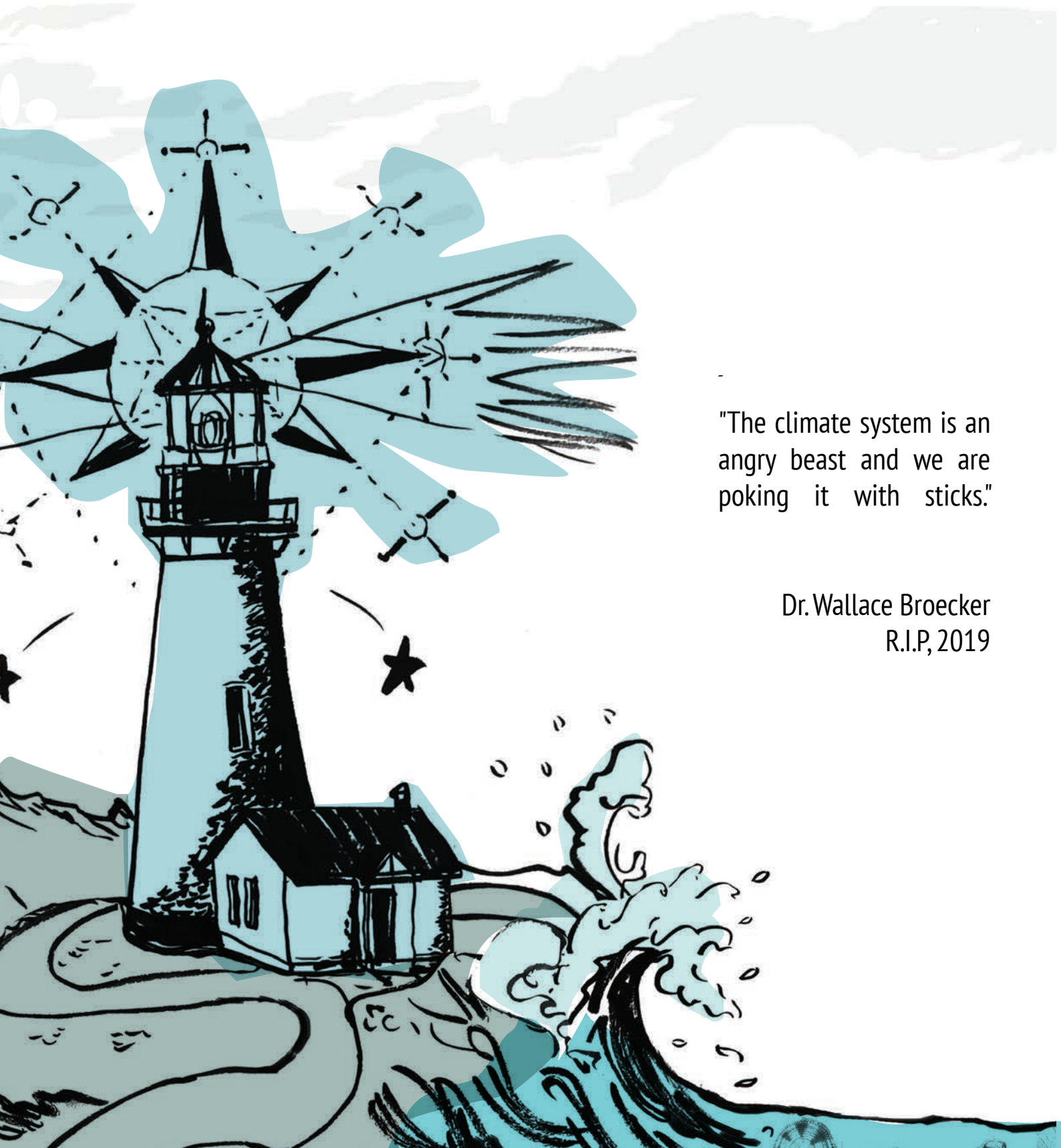
Aquesta tesi doctoral està subjecta a la llicència **Reconeixement 4.0. Espanya de Creative Commons.**

Esta tesis doctoral está sujeta a la licencia **Reconocimiento 4.0. España de Creative Commons.**

This doctoral thesis is licensed under the **Creative Commons Attribution 4.0. Spain License.**

# CAPÍTOL 5

## CONCLUSIONS



"The climate system is an angry beast and we are poking it with sticks."

Dr. Wallace Broecker  
R.I.P, 2019



**E**n aquesta tesi s'ha abordat la reconstrucció de les condicions marines superficials i profundes, i també de la variabilitat hidroclimàtica (precipitació), al llarg dels darrers 2.700 anys a la regió central de la Mediterrània occidental. Hom ha obtingut la informació necessària a partir de dos tipus d'arxius: sediment marins i estalagmites. La integració subsegüent de la informació ha permès comprendre millor la dinàmica del sistema climàtic en aquest període de temps. Convé assenyalar l'alta sensibilitat climàtica de l'àrea d'estudi, així com certes peculiaritats que li són pròpies, com exemple ara que és una de les poques regions a tota la Mediterrània on s'hi forma aigua fonda, concretament la WMDW. Els períodes climàtics/històrics descrits pels últims 2.700 anys han estat definits com segueix: TP (fins l'any 123 BCE<sup>1</sup>); RP (123 BCE-470 CE<sup>2</sup>), EMA (470-900 CE); MCA (900-1275 CE) i, LIA (1275-1850 CE).

Hom ha reconstruït les condicions superficials de la mar a partir de cinc testimonis de sediment provinents de dues localitzacions (NMin i MR3) al nord de Menorca. Les cronologies s'han elaborat curosament integrant datacions absolutes i relatives. L'anàlisi de les dades de SST, juntament amb perfils oceanogràfics, ha evidenciat que el senyal de Mg/Ca-SST reflecteix les condicions pròpies dels mesos d'abril i maig als 40 m superiors de la columna d'aigua. Per la seva part, el senyal de les alquenones ha estat interpretat com una mitjana anual, tot i que decantada cap als mesos d'hivern donat que la producció primària estival és extremadament baixa. La mitjana anual integrada de les reconstruccions d'alquenones-SST explicaria el caràcter més suavitzat de les oscil·lacions en comparació amb els registres de Mg/Ca-SST.

Els registres de SST dels diferents testimonis han estat agrupats en un únic registre o corba "stack", procediment que permet representar millor les estructures més robustes compartides pels registres individuals i minimitzar sorolls en els registres individuals. Per aquestes raons, aquest procediment és particularment útil pels darrers mil·lennis, en que les variacions de SST són sovint al límit de la resolució i de l'error de les tècniques analítiques. Tant el registre "stack" de Mg/Ca-SST com el derivat de les alquenones mostren consistentment una tendència cap al refredament al llarg del període estudiat. Des del màxim de les SST a l'RP, aquest refredament presenta valors compresos entre 1,7-2,0°C kyr<sup>-1</sup> en el registre de Mg/Ca, essent menys pronunciat en el cas de les

---

<sup>1</sup> BCE: Before Common Era years

<sup>2</sup> CE: Common Era years

alquenones ( $1,1^{\circ}\text{C kyr}^{-1}$ ). La tendència cap al refredament és consistent amb la disminució de la insolació estival. El refredament general és interromput de manera puntual per oscil·lacions de SST d'escala multiseccular. Així, durant l'EMA el refredament fou progressiu, mentre que durant la MCA hi hagué una variabilitat pronunciada, amb dues fases d'escalfament intens que assoleixen SST més càlides que a la LIA. Aquest últim període és molt inestable i fred, amb un primer subperíode més càlid i amb oscil·lacions de SST més grans (LIAa), i un segon subperíode més fred i amb oscil·lacions menors (LIAb). Aquests dos subperíodes de la LIA es diferencien millor en el registre de Mg/Ca-SST que en el de les alquenones. La comparació entre els registres de Mg/Ca-SST i de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$  en closques de *G. bulloides* indica que, en general, a les fases més càlides el balanç evaporació-precipitació (E-P) assolía valors més alts.

La comparació dels registres de SST amb altres reconstruccions paleoclimàtiques a Europa suggereix una resposta en termes de temperatura força heterogènia, tant al continent europeu com a les regions marines adjacents. La reconstrucció de les SST a Balears indica que tant la NAO com l'AMO haurien influenciat el clima de l'àrea d'estudi al llarg del període considerat. En canvi, no mostren una connexió clara amb la de la TSI.

Fases de la NAO negatives es correlacionen sovint amb fases de refredament al registre de Mg/Ca-SST, que és quan la seva relació està aparentment millor definida, tot i que la mateixa no està exempta de complexitat si hom considera tot el registre. El patró de relacions sembla més consistent, però, durant el darrer mil·lenni, en que les reconstruccions de la NAO estan més ben acotades, amb SST més fredes i valors del balanç d'E-P més baixos coincidint amb fases negatives de la NAO. Els resultats són consistents, amb un augment de la tempestuositat cap al sud durant aquestes fases. És en els darrers quatre segles<sup>3</sup> quan les SST mostren una relació més estreta amb l'AMO, amb SST càlides coincidint amb valors alts d'aquesta oscil·lació. Aquesta evidència palesa una connexió estreta entre la climatologia a la Mediterrània i l'Atlàntic Nord al llarg dels darrers mil·lennis.

Pel que fa a la circulació marina profunda, hom ha validat per primer cop l'aplicació de l'índex UP10 en registres fòssils per reconstruir la intensitat dels corrents de fons

---

<sup>3</sup> Període que abasten les reconstruccions de l'AMO.

relacionats amb els episodis de formació d'aigua fonda al golf de Lleó. mitjançant Aquesta validació ha estat possible mercès a l'ús de dades modernes provinents de dos ancoratges instrumentats situats al mateix golf de Lleó, que és l'àrea font de l'aigua fonda, i al nord de Menorca, per on circula aquesta aigua. L'increment de la velocitat del corrent prop del fons en ambdós ancoratges, amb puntes de fins a  $24 \text{ cm s}^{-1}$  al nord de Menorca, permeté identificar un episodi de formació d'aigua fonda durant el període de monitoratge, entre l'octubre de 2012 i l'octubre de 2014. L'anàlisi de la mida de gra de les partícules sedimentàries recollides amb les trapes de sediment instal·lades als ancoratges revelaren l'aparició de sorres amb una moda granulomètrica (40-100  $\mu\text{m}$ ) pròpia de les mostres relacionades amb esdeveniments de formació d'aigua fonda. Aquest tret granulomètric és coherent amb l'obtingut a les mostres de testimonis de sediment amb valors elevats d'UP10 atribuïdes, consegüentment, a episodis d'augment de la velocitat dels corrents de fons.

La aplicació de l'índex granulomètric UP10 als testimonis de sediment ha permès avaluar l'evolució de la intensitat de la formació d'aigua fonda al golf de Lleó durant els darrer tres mil·lennis. Els episodis més intensos tingueren lloc en intervals relativament càlids com el RP, el final de la MCA i la primera part de la LIA. Aquests episodis s'associen majoritàriament amb períodes d'augment en el balanç E-P, més que amb la pèrdua de flotabilitat deguda únicament al refredament. Les dades suggereixen que SST primaverals càlides pogueren jugar un paper important incrementant el balanç E-P i afavorint així la pèrdua de flotabilitat per increment de la salinitat. Per contra, hi hagué una reducció progressiva de la convecció durant l'EMA, la qual resultà en episodis febles de formació d'aigua fonda durant la major part de la MCA.

La comparació de la nova reconstrucció de la formació d'aigua fonda amb altres registres oceanogràfics i climàtics indica situacions diferents abans i després de l'EMA. Abans de l'EMA, és a dir en el TP i el RP, episodis intensos de formació d'aigua fonda a la nostra àrea d'estudi coincidiren amb bones ventilacions de la LIW a la conca mediterrània oriental i fases positives de la NAO. Després de l'EMA, durant la MCA i la LIA, hom observa tendències oposades en el mode d'operació de les cel·les de convecció de les conques occidental i oriental, la qual cosa és consistent amb resultats previs tant de reconstruccions hidroclimàtiques a la Mediterrània com de mesures instrumentals. D'aquí se'n desprèn l'existència d'un balanç climàtic est-oest a la mar

Mediterrània, el qual podria respondre a una influència més forta de l'EA/WR sobre la regió. Els resultats d'aquesta tesi palesen, per una banda, el caràcter complex de la relació entre el registre de formació d'aigua fonda i la reconstrucció de la NAO, particularment durant els últims 1.500 anys i, per una altra banda, les dificultats d'acotar els factors que desencadenen els canvis en la formació d'aigua fonda, canvis provocats probablement per interaccions i intensitats diferents en els patrons de la NAO i l'EA.

Hom ha estudiat la variabilitat hidrològica dels darrers 2.700 anys mitjançant cinc estalagmites de les coves de Sa Balma des Quartó i del Pirata, a Mallorca, les quals han resultat ésser bons arxius hidroclimàtics de la regió central de la Mediterrània occidental. Valors relativament pesats (lleugers) de la relació  $\delta^{18}\text{O}$  s'interpreten com condicions més seques (més humides). D'aquesta manera, s'ha elaborat el primer registre hidrològic basat en aquest tipus d'arxius per a la nostra zona d'estudi i per a aquest període. El nostre és el primer registre hidroclimàtic basat en aquest tipus d'arxius per a la zona d'estudi i el període considerats.

Els registres obtinguts indiquen condicions dominantment humides a l'inici del RP, a la primera meitat de l'EMA i durant tota la LIA, que contrasten amb les condicions més seques enregistrades pel RP tardà (anys 200-470 CE), la segona meitat de l'EMA (anys 700-900 CE) i tota la MCA. Considerant una escala de temps secular, amb observa que els intervals amb una NAO positiva persistent coincideixen freqüentment amb condicions més seques al llarg del període estudiat, mentre que els intervals amb una NAO persistentment negativa ho fan amb condicions més humides. La presència en una de les estalagmites, al voltant de l'any 1622 CE, és a dir dins la LIA, d'un nivell detrític enriquit en Ti, ha estat interpretada com un marcador d'inundacions associat a un episodi extrem de pluja.

La comparació entre els registres de  $\delta^{18}\text{O}$  de les estalagmites estudiades i registres hidroclimàtics de la Península Ibèrica corrobora que els patrons regionals foren força heterogenis durant el RP i l'EMA. En canvi, a la MCA i la LIA els patrons regional foren més homogenis. A més, hom ha observat abans i després de l'EMA una relació diferent entre els patrons hidroclimàtics preenregistrats a les estalagmites de Mallorca i altres reconstruccions, com ara l'activitat de les tempestes al GoL. L'EMA també marca un canvi en la relació entre les cel·les convectives de la Mediterrània occidental i oriental, amb un comportament paral·lel abans d'aquest període i contrari després. Els

registres dels espeleotemes de Balears recolzen, per tant, hipòtesis prèvies que proposaven signes oposats de NAO/EA abans de l'EMA, passant a signes compartits de NAO/EA després de l'EMA, tot i que amb una influència remarcable de l'EA/WR.

La compilació de registres de SST, formació d'aigua fonda i hidroclimàtics produïts en aquesta tesi i prèviament suggereix patrons climàtics no estacionaris a la regió central de la Mediterrània occidental al llarg dels períodes que conformen els darrers 2.700 anys. Tot plegat revela canvis en les configuracions dels patrons atmosfèrics i les teleconnexions. Així, tenint en compte els registres de Balears i reconstruccions prèvies de la TSI, la NAO i els signes de la parella NAO/EA, hom presenta en aquesta tesi set combinacions diferents que permeten explicar els canvis observats al llarg del lapse de temps investigat. La variabilitat climàtica fou més complexa i/o tingué una freqüència més alta en el RP tardà i la primera meitat de l'EMA. Els nostres resultats palesen que l'EMA fou possiblement un període de transició durant el qual es produí una reconfiguració atmosfèrica significativa.

Com succeeix sovint en treballs d'aquesta mena, i més enllà dels objectius inicials, durant el desenvolupament d'aquesta tesi han sorgit també nous reptes i dubtes. Això vol dir que caldrà seguir produint i avaluant noves reconstruccions climàtiques regionals amb una bona resolució a fi i efecte de continuar abocant llum a les complexitats del sistema climàtic. Encara queda molt per acabar d'entendre els processos, mecanismes, retroalimentacions, efectes de llinar i connexions entre els patrons atmosfèrics i els tipus de clima regionals i llur variabilitat a diferent escales de temps. I tot això sense oblidar que en el temps present hi ha també patrons atmosfèrics significatius que encara no han estat ben definits ni són compresos del tot. Entenem que els resultats de la recerca sobre aquestes qüestions pot ajudar a aïllar i resoldre incògnites sobre l'escalfament global en curs. Les reconstruccions realitzades en la tesi que teniu a les mans tal vegada facilitin la realització i la millora de models predictius (o retropredictius), doncs estan fonamentades en registres més llargs que no els instrumentals, cosa que podria reduir incerteses. Naturalment, també cal mantenir i augmentar l'esforç d'adquisició de dades climàtiques instrumentals, climàtics de manera que hom pugui disposar de sèries cada cop més llargues.

De manera més particular, també suggerim aprofundir en els registres de les estalagmites presentats en aquesta tesi, i d'altres espeleotemes. Són arxius que encara

han d'oferir moltes dades valuoses en termes paleoclimàtics. En aquest context, convindria considerar completar la informació derivada de les reconstruccions hidroclimàtiques dels últims segles amb la continguda en documents històrics, en particular els registres de sequeres i inundacions amb cronologies força acurades recollides en rogatòries eclesiàstiques i altres fonts. També seria interessant contrastar, quan fos possible, els registres hidroclimàtics de les estalagmites amb dades instrumentals, amb una doble finalitat: millorar la interpretació dels registres del passat recent i calibrar d'alguna manera les variacions que hom hi ha observat. A més, l'anàlisi estadística dels registres espeleotèmics podria aportar llum sobre períodes de retorn i episodis hidrològics extrems i, potser, aplicar-los a les prediccions del presents i a situacions futures. De feina per fer, no en faltarà, per tant, a qui vulgui endinsar-se en el fascinant món de les reconstruccions paleoclimàtiques i paleoceanogràfiques.