

Resum

La concentració amb la qual s'aconsegueixi establir el diòxid de carboni en l'atmosfera serà sempre força més alta que la que s'ha donat al llarg dels darrers quatre-cents mil anys. No hi ha dubte que es produirà un canvi en el clima i que la seva influència sobre els sistemes naturals i els socioeconòmics serà significativa. Quins seran els canvis, com i quan es produiran ja és més complex de saber. Per això ens calen ecosistemes sentinella. En aquest article es presenta el cas dels estanys d'alta muntanya i els de zones remotes en general. Aquests sistemes ens permeten tenir punts d'observació similars repartits per molts llocs del món i, a més a més, tenen un registre històric en els seus sediments que ens faciliten posar en context els canvis del present respecte del passat. Aquests indrets remots també ens permeten estudiar la interacció del clima amb altres components del canvi global, com ara la contaminació a llarga distància i els canvis d'usos del territori.

Abstract

In any potential future scenario, the concentration at which it will be possible to stabilize atmospheric carbon dioxide will be higher than any recorded during the last 400,000 years. There is no doubt that climate will change and that its influence on the natural and socio-economic systems will be significant. More difficult to predict are the changes that will occur and when. Sentinel ecosystems may help to observe these changes. This article presents the case of the high mountain lakes and remote areas in general. These systems offer similar observation points distributed throughout the world and they also have an historical record in their sediments that makes easier the comparison between present changes and those occurred in the past. These remote places are also suitable for studying the interaction of climate with other components of global change such as long-range pollution and land use changes.

Com a resultat de cremar combustibles fòssils per a obtenir-ne energia s'està produint un increment de diòxid de carboni a l'atmosfera des de fa unes dècades. Sigui quina sigui la concentració atmosfèrica a la qual s'aconsegueixi estabilitzar, el valor sempre serà significativament superior als que s'han donat al llarg dels darrers quatre-cents mil anys. Avui en dia, no hi ha dubtes que es produirà un canvi significatiu en el clima i, per tant, en els sistemes naturals i agrícoles, i de retruc en tot el sistema socioeconòmic del planeta. La incertesa de com evolucionarà el clima és notable a hores d'ara, sobretot pel que fa a la projecció regional del canvi. Les incògnites encara són més sobre com reaccionaran els ecosistemes. Més enllà de tenir clar que, de canvis, d'haver-n'hi n'hi haurà, ens preocupa tot un seguit de qüestions: com pot variar la resposta dels diversos ecosistemes, quina intensitat i extensió poden tenir els canvis, a quina velocitat poden produir-se, si podrem distingir les fluctuacions habituals del clima i els seus efectes de tendències persistents de canvi que ens portin cap a noves situacions. Per a donar resposta a aquest tipus de preguntes, tenim a l'abast tres tipus d'aproximacions complementàries. D'una banda, tenim l'ús dels coneixements existents organitzant-los en models dinàmics que puguin preveure el que passarà; això ens permet comprendre millor els escenaris possibles, encara que té les limitacions pròpies de la complexitat de la qüestió, implícita en la multitud de processos que hi intervenen i que són rellevants a escales espaciotemporals diferents. Una altra opció és la de cercar situacions similars en el passat i fer analogies amb el que pot passar en un futur. En aquest sentit la limitació és que no hi ha, en el passat, una situació en què les condicions físiques i biòtiques del planeta fossin prou semblants a aquelles a què hom pot preveure que podem arribar en el canvi actual. Malgrat això, el passat relativament recent, els darrers vint mil anys, per exemple, pot il·lustrar sobre amb quina celeritat poden produir-se el canvis, i també pot proveir-nos d'analogies de situacions per les quals podem passar encara que sigui de manera transitòria. El tercer tipus d'aproximació és la pròpia observació del canvi. Com que és una situació en què estem immersos, el canvi climàtic i les seves conseqüències són una cosa que podem seguir dia a dia i, eventualment, anar-hi reaccionant o adaptar-nos-hi. Qualsevol anticipació, per lleu que sigui, pot permetre'ns alleugerir les conseqüències indesitjables. El que és estrictament el clima, el podem anar seguint a través de l'enregistrament dels diversos paràmetres meteorològics i analitzant-los estadísticament d'una manera apropiada. Pel que són, però, els efectes del clima sobre els sistemes naturals, l'observació ja no és tan simple, ja que els efectes de la fluctuació climàtica es barregen amb les influències d'altres activitats humanes i les fluctuacions pròpies de la dinàmica complexa dels sistemes naturals i els agrosistemes. En aquest sentit, ens són d'utilitat el que s'ha anomenat *ecosistemes sentinella*. És a dir, llocs que reben poca influència humana directa, i que, per tant, permeten observar sense interferències la reacció de la biosfera al canvi que s'està produint en el clima. Molts d'aquests sistemes, els trobem en zones remotes —els sistemes àrtics i antàrtics, per exemple—, però també en tenim en llocs més propers —entre d'altres, els estanys d'alta muntanya.

Hi ha diverses raons per les quals els estanys de muntanya són uns bons ecosistemes sen-

tinella. En general es troben en llocs de relativa poca activitat humana a les conques, particularment els situats a més altitud. Són sistemes relativament senzills i petits, tant ells mateixos com les seves conques, de manera que se'n poden fer seguiments i es pot comprendre el que hi passa amb més facilitat que en molts d'altres ecosistemes. Com que són sistemes petits i la dinàmica que tenen està basada en organismes de vida molt curta, la resposta a les fluctuacions dels paràmetres que els forcen és ràpida. Hi ha algunes característiques que els fan particularment sensibles a la influència atmosfèrica. Per exemple, l'existència d'una coberta de gel durant l'hivern i un paquet de neu a la conca. Aquestes estructures integren els esdeveniments meteorològics al llarg d'uns quants mesos i en canalitzen la influència sobre el sistema lacustre cap al període de fusió, de manera que els fan més sensibles a captar tendències que es reparen durant els mesos d'hivern i primavera d'una manera fluctuant. D'altra banda, com que es tracta de sistemes aquàtics d'aigües molt diluïdes són molt sensibles a les entrades de substàncies nutritives, tòxiques o que en modifiquin l'entorn proper; per tant, les fluctuacions climàtiques que modifiquen la manera com els ecosistemes terrestres exporten substàncies en la seva aigua de drenatge es manifesten ràpidament en canvis significatius als sistemes lacustres. A aquestes propietats que podríem qualificar de sensibilitat, cal afegir-hi l'avantatge que els estanys tenen en els sediments el seu propi registre d'allò que ha anat passant al llarg de la seva història. L'abundància i la varietat d'estanys de muntanya permeten desxifrar i calibrar els senyals dels sediments i substituir la variació en el temps per la variació en l'espai, i d'aquesta manera reconstruir el que va succeir en temps passats. Aquesta perspectiva històrica pot completar-se amb una perspectiva geogràfica àmplia, ja que hi ha estanys de característiques similars en molts llocs del món.

Primers indicis dels efectes del canvi climàtic

En alguns estanys d'Europa s'han establert estacions limnològiques que permeten seguir la resposta dels estanys a les fluctuacions climàtiques que forcen els sistemes. En aquestes estacions generalment hi ha una estació meteorològica automàtica, col·lectors de deposició atmosfèrica i sensors a l'estany, i el seguiment s'hi completa amb estudis de la dinàmica de poblacions dels organismes i del transport de substàncies entre la conca i l'estany. Un exemple d'aquest tipus d'estació el tenim a l'estany Redon a la Val d'Aran.

Encara que actualment es compti amb estacions meteorològiques a les conques d'aquests estanys, les sèries de dades que tenen són encara massa curtes per a poder valorar els canvis. Per a poder-ho fer, s'utilitzen tècniques d'interpolació i extrapolació a partir de sèries temporals de terres més baixes, les quals tenen un registre molt més llarg. Aquests procediments es valen de les sèries curtes de l'estació situada a la vora de l'estany per a validar-ne els resultats. En general, s'aconsegueixen bones extrapolacions de les temperatures mitjanes mensuals pels darrers dos-cents anys.

Aquestes sèries reconstruïdes ens permeten analitzar quina ha estat la resposta dels estanys i dels sistemes de la seva conca a les fluctuacions. Això ho podem fer a partir de dades històriques si s'ha mantingut un seguiment al lloc, o pot fer-se a partir de l'estudi molt detallat dels primers centímetres del sediment dels estanys. En el cas de l'estany Redon, per exemple, veiem com en les darreres dècades s'ha produït un increment continuat de la temperatura, particularment a la primavera i la tardor. Aquesta tendència en la temperatura apareix reflectida en l'increment de la presència relativa de dues petites diatomees planctòniques (*Fragilaria nana* i *Cyclotella pseudostelligera*), que han augmentat d'una manera sense precedents en els darrers dos-cents anys. Un aspecte interessant és que els estudis actuals a l'estany han posat de manifest que aquestes algues creixen respectivament al setembre i a l'octubre, i les seves poblacions reproduïxen precisament les fluctuacions de temperatura mitjana d'aquests dos mesos. Per tant, es tracta d'un lligam clar i directe amb les tendències de canvi de tardor, probablement com a resposta a un allargament del període d'estratificació amb una termoclina profunda. Curiosament, d'augment de diatomees planctòniques petites, se n'han observat en d'altres estanys similars, però molt allunyats geogràficament. Comença a haver-hi molta evidència de canvis similars en estanys àrtics i subàrtics tant del continent americà com de l'europèu. Aquest fet és remarcable, perquè el registre sedimentari de diatomees d'aquests indrets àrtics és gairebé idèntic durant tot el temps d'existència dels estanys. Només apareix una tendència, en el sentit suau esmentat, en les darreres dècades. Per tant, ens està indicant que als sistemes àrtics s'està produint un canvi important sense precedents recents. L'extensió d'aquests sistemes fa que el senyal vagi més enllà de l'anècdota i tingui transcendència global.

D'aquestes observacions de l'actualitat també se n'han derivat altres conclusions. S'ha vist que hi ha certa dependència entre el temps de generació i l'escala temporal en què es produeix l'acoblament amb el clima. Els organismes de vida curta, de generacions de dies, com les algues, segueixen les fluctuacions de prop; els organismes de temps de vida més llarg integren períodes de temps més grans. Per exemple, les poblacions de quironòmids, amb generacions com a mínim d'un any, sembla que segueixen les fluctuacions de l'escala de dècades. Si, aquestes observacions, les extrapolem a organismes terrestres de vida encara més llarga, hem de pensar que el que podem estar observant com a resposta al canvi climàtic (el canvi en la fenologia de les plantes, la migració cap al nord d'algunes papallones, etc.) encara no és més que una fase incipient, segurament només la punta de l'iceberg del que realment pot passar.

En els aspectes biogeodinàmics del conjunt de l'estany també es reflecteixen tendències, però aquestes respostes de sistema sencer apareixen a escales d'unes quantes dècades. Per exemple, hi ha una clara resposta en alguns dels indicadors a l'escalfament del segle xx respecte del segle xix. Quan fluctuacions de la mateixa intensitat es produeixen en temps molt més breus, el sistema mostra una elevada histèresi. Aquest aspecte ens alerta un cop més que els canvis en els sistemes terrestres poden arrencar de manera molt subtil i, de sobte, accelerar-se.

El passat com a referència

La majoria d'estanys de muntanya tenen l'origen en la darrera glaciació; en el cas dels Pirineus podem trobar registres que van d'entre deu mil i quinze mil anys. Això, encara que pugui semblar molt, no ens serveix excessivament com a referència; però, si més no, és suficient per a il·lustrar la magnitud dels canvis que podem esperar en els ecosistemes.

El sediment és un registre la història del qual està escrita en una varietat de codis diferents i la interpretació que se'n faci no és sempre fàcil ni directa. Una de les fonts de més informació són els microfòssils. El pol·len, per exemple, ens ofereix els canvis de la vegetació, els quals, en els ambients remots, es deuen fonamentalment a canvis climàtics. Els darrers deu mil anys, el que es coneix per l'Holocè, corresponen a un període de relativa poca variació climàtica. Malgrat això, hom observa que es van produir canvis significatius en la vegetació dominant. Mitjançant tècniques estadístiques i utilitzant la informació climàtica que hi ha sobre quin és el clima que correspon a diferents tipus funcionals de vegetació, pot fer-se reconstruccions quantitatives d'alguns paràmetres climàtics. En el cas dels Pirineus, per exemple, es veu que no hi va haver canvis significatius en els valors de la mitjana anual de temperatura; els canvis de vegetació durant l'Holocè probablement van ser una conseqüència de variacions en l'estacionalitat i, potser, en la precipitació. Per exemple, la diferència de temperatures entre el mes més càlid i el mes més fred durant la primera meitat de l'Holocè era notablement més àmplia que en la segona meitat, tant perquè l'hivern es va anar fent més càlid, com perquè les temperatures d'estiu van baixar. Actualment, les previsions de canvi climàtic es fan encara sobre mitjanes anuals; pel sistema climàtic en conjunt potser l'estacionalitat no és un aspecte vital, però pels organismes sí; als registres dels estanys veiem que no cal que la mitjana canviï si l'estacionalitat ho fa perquè es donin profunds canvis en el paisatge.

Altres microfòssils ens permeten reconstruir altres aspectes dels canvis del passat. Els crisòfits, un grup d'algues unicel·lulars, són probablement bons indicadors de la durada del gel als estanys. Als Pirineus, per exemple, l'ús dels cists silícis que els crisòfits deixen als sediments ens permeten posar de manifest, d'una manera molt més clara que el pol·len, la fluctuació freda de l'anomenat *Dryas* recent, que hi va haver fa uns 12.500 anys. També ens indiquen que, en els períodes de transició climàtica de centenars d'anys, sembla que hi ha una probabilitat més elevada d'episodis extrems. Aquest és un aspecte fonamental del canvi climàtic de transcendència immediata, i que ens planteja les qüestions de fins a quin punt augmentarà la freqüència d'episodis extrems de fred, calor i precipitació, i en quina mesura poden determinar canvis permanents en el nostre entorn natural.

Altres microfòssils, com les diatomees, ens permeten reconstruir propietats químiques de l'aigua. Una de les que se'n poden inferir amb més fiabilitat és la capacitat neutralitzadora d'àcids (ANC). Actualment, s'està observant un augment d'aquesta capacitat als Alps, l'Himàlaia i els Pirineus. Tot i que encara no s'ha determinat amb detall els mecanismes que la determinen, sembla que està relacionat amb una meteorització més elevada de la roca de la conca a causa

d'un augment de l'extensió del sòl o de l'activitat biològica que hi ha. Si mirem el passat, aprofitant la capacitat indicadora de les diatomees, observem que al llarg de l'Holocè l'ANC de les aigües ha anat fluctuant i ha arribat a ser el doble i el triple del que és actualment en zones granítiques dels Pirineus. Hi ha indicacions que els canvis estaven relacionats amb un major desenvolupament del sòl a les conques. Una fluctuació molt significativa va produir-se a mitjan Holocè coincidint amb un deteriorament del clima. Aquest període és interessant perquè coincideix amb la dessecació del Sàhara i és un dels exemples en què es veu que una fluctuació climàtica produïda per un lleuger canvi en la radiació que arriba a la Terra es veu retroalimentada per canvis en la vegetació, i s'hi produeixen uns efectes molt notables en un període de temps relativament curt.

Resumint, dels registres del passat als estanys, en podem treure un parell de conclusions d'aplicació a la situació present. Primer, perquè hi hagi canvis significatius de la vegetació dominant i, per tant, del paisatge, no fa falta que es donin grans canvis climàtics; aspectes d'estacionalitat poden ser suficients. Segon, durant les transicions climàtiques és probable que els fenòmens extrems augmentin i és possible que fenòmens de retroalimentació positiva facin que els canvis en els sistemes naturals tinguin lloc de manera abrupta, és a dir, que siguin perceptibles en el transcurs d'una o unes quantes generacions.

Interaccions amb d'altres components del canvi global

El canvi climàtic induït per l'augment de gasos d'efecte hivernacle a l'atmosfera ha esdevingut el component més popular del canvi global. No obstant això, hi ha altres fenòmens que s'estan donant a escala global en paral·lel amb el canvi climàtic. Entre aquests, els relacionats amb la contaminació atmosfèrica també poden detectar-se i seguir-se als estanys de muntanya. Inicialment, l'efecte més conspicu va ser el de l'acidificació d'alguns d'aquests, que, en segons quins casos, va arribar fins al punt de canviar la flora i la fauna dels estanys. Les muntanyes Tatra entre Eslovàquia i Polònia són un exemple d'aquest cas extrem. L'estudi del fenomen mitjançant el registre del sediment va posar de manifest tant la gènesi del procés com la lenta recuperació després que les emissions de sofre a l'atmosfera es reduïssin. Un dels aspectes més interessants, pel que aquí ens ocupa, va ser l'evidència que la deposició àcida va provocar la disrupció de l'acoblament entre clima i acidesa de l'aigua. Estudis en estanys del Tirol van mostrar que, fins a la irrupció de la industrialització, el pH de l'aigua dels estanys havia fluctuat amb la temperatura de l'aire, augmentant i decreixent a l'uníson. Amb la pluja àcida la fluctuació en paral·lel es va desfer. Malgrat això, en els anys molt càlids encara s'observa una certa recuperació del pH. D'acord amb aquestes pautes, caldria esperar que un escalfament global facilités la recuperació de les zones acidificades, que permetria millorar l'efectivitat de les mesures de reducció d'emissions.

L'efecte positiu de l'escalfament sobre l'acidificació no té perquè ser general per a totes les formes de contaminació atmosfèrica a llarga distància. Sembla que l'increment de pluja en al-

gunes zones d'Escòcia està provocant un alliberament més elevat de metalls des dels sòls, en particular, del plom. Períodes més llargs d'estratificació també poden incrementar la mobilització de compostos des del sediment. Una comparació de la quantitat de metalls al sediment superficial amb la del sediment corresponent a èpoques preindustrials mostra un enriquiment en molts estanys alpins per tot Europa. D'altra banda, recentment s'ha descobert una acumulació selectiva d'organoclorats semivolàtils en els sediments i en els peixos d'alta muntanya. L'acumulació augmenta amb l'altitud de manera inversament proporcional a la temperatura mitjana del lloc. Aquest fet formaria part del procés de destil·lació global que s'està donant amb aquests compostos, que inclouen entre d'altres el DDT i els seus derivats, i els PCB d'elevat pes molecular. Les zones càlides i temperades del planeta on es fan o es van fer servir els compostos amb més intensitat actuen de fonts emissores a l'atmosfera, i les zones fredes actuen com a receptores i acumuladores. El canvi climàtic comportarà una modificació dels dos tipus d'àrees; les àrees que acumulen compostos probablement disminuiran, però pot ser que les concentracions hi augmentin. Els estanys de muntanya són excel·lents observatoris per a seguir el fenomen d'interacció entre clima i altres aspectes del canvi global relacionats amb les emissions de contaminants a l'atmosfera.

Referències bibliogràfiques

- BATTARBEE, R. W.; GRYNES, J. A.; THOMPSON, R.; APPLEBY, P. G.; CATALAN, J.; KORHOLA, A.; BIRKS, H. J. B.; LAMI, A. (2002). «Climate variability and ecosystem dynamics at remote alpine and arctic lakes: the last 200 years». *Journal of Paleolimnology*, núm. 28, p. 161-179.
- CAMARERO, L.; CATALAN, J.; PLA, S.; RIERADEVALL, M.; JIMÉNEZ, M.; PRAT, N.; RODRÍGUEZ, A.; ENCINA, L.; CRUZ-PIZARRO, L.; SÁNCHEZ, P.; CARRILLO, P.; TORO, M.; GRIMALT, J.; BERDIE, L.; FERNÁNDEZ, P.; VILANOVA, R. (1995). «Remote mountains lakes as indicators of diffuse acidic and organic pollution in the Iberian peninsula (AL:PE 2 studies)». *Water Air and Soil Pollution*, núm. 85, p. 487- 492.
- CATALAN, J. (2002a). «Los lagos de montaña como observatorios». *Mundo Científico*, núm. 236, p. 56-59.
- (2002b). «L'observació de canvis ambientals per mitjà dels estanys d'alta muntanya». *Aula d'Ecologia*, núm. 20, p. 37-41.
- CATALAN, J.; PÉREZ-OBÍOL, R.; PLA, S. (2000). «Canvis climàtics a Aigüestortes durant els darrers 15.000 anys». A: *V Jornades sobre Recerca al Parc Nacional d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici*, p. 45-52.
- CATALAN, J.; PLA, S.; RIERADEVALL, M.; FELIP, M.; VENTURA, M.; BUCHACA, T.; CAMARERO, L.; BRANCELJ, A.; APPLEBY, P. G.; LAMI, A.; GRYNES, J. A.; AGUSTÍ-PANAREDA, A.; THOMPSON, R. (2002). «Lake Redó ecosystem response to an increasing warming in the Pyrennees during the twentieth century». *Journal of Paleolimnology*, núm. 28, p. 129-145.

- CATALAN, J.; VENTURA, M.; BRANCELJ, A.; GRANADOS, I.; THIES, H.; NICKUS, U.; KORHOLA, A.; LOTTER, A. F.; BARBIERI, A.; STUHLÍK, E.; LIEN, L.; BITUŠÍK, P.; BUCHACA, T.; CAMARERO, L.; GOUDSMIT, G. H.; KOPÁČEK, J.; LEMCKE, G.; LIVINGSTONE, D. M.; MÜLLER, B.; RAUTIO, M.; ŠIŠKO, M.; SORVARI, S.; ŠPORKA, F.; STRUNECKÝ, O.; TORO, M. (2002). «Seasonal ecosystem variability in remote mountain lakes. Implications for detecting climatic signals in sediment records». *Journal of Paleolimnology*, núm. 28, p. 25-46.
- GRIMALT, J. O.; FERNÁNDEZ, P.; BERDIE, L.; VILANOVA, R.; CATALAN, J.; PSENNER, R.; HOFER, R.; AP-
PLEBY, P. G.; ROSSELAND, B. O.; LIEN, L.; MASSABAU, J. C.; BATTARBEE, R. W. (2001). «Selective trapping of organochlorine compounds in mountain lakes of temperate areas». *Environmental Science & Technology*, núm. 35, p. 2690-2697.
- MOSELLO, R.; LAMI, A.; MARCHETTO, A.; ROGORA, M.; WATHNE, B.; LIEN, L.; CATALAN, J.; CAMARERO, L.; VENTURA, M.; PSENNER, R.; KOINIG, K.; THIES, H.; SOMMARUGA-WÖGRATH, S.; NICKUS, U.; TAIT, D.; THALER, B.; BARBIERI, A.; HARRIMAN, R. (2002). «Trends in the water chemistry of high mountain lakes in Europe». *Water, Air, and Soil Pollution*, núm. 2, p. 75-89.