

Oceans, els grans segrestadors de CO₂

Eva Calvo

Investigadora del CSIC a l'Institut de Ciències del Mar

Els oceans tenien una funció vital en la modulació i regulació del clima del planeta, especialment pel seu important paper com a segrestadors de diòxid de carboni, les concentracions del qual han augmentat de manera considerable a l'atmosfera com a conseqüència de l'activitat humana. El concepte de canvi climàtic associat a l'activitat antropogènica no és del tot nou. Ja el 1824, Joseph Fourier va introduir el concepte d'efecte d'hivernacle, segons el qual la Terra emetia radiació infraroja, una part de la qual era retinguda per l'atmosfera. L'any 1859, John Tyndall va determinar que l'existència d'alguns gasos (com el CO₂ i el H₂O) feia que la Terra absorbís aquesta radiació infraroja, i fou el primer a formular la possibilitat d'un canvi climàtic provocat per un canvi en la concentració d'aquests gasos. Unes dècades més tard, l'any 1896, Svante Arrhenius publicà els primers càlculs sobre canvi climàtic degut a les emissions antropogèniques de CO₂. Arrhenius calculà que un augment d'un 50 % en la concentració de CO₂ atmosfèric provocaria un augment de la temperatura de 5 °C, però pensava que trigaríem segles, fins i tot mil·lennis, a arribar a concentracions tan elevades de CO₂, ja que aleshores es creia que els oceans serien capaços d'absorbir tot el CO₂ derivat de les activitats humanes. Ja al segle XX, l'any 1938, Guy S. Callendar va concloure que l'augment de 0,5 °C que s'estava observant en algunes zones del planeta era conseqüència de les emissions de CO₂. En aquell moment no se li va fer gaire cas, ja que no demostrava que el CO₂ estigués augmentant i, a més, no es creia que la relativa petita concentració de CO₂ a l'atmosfera pogués ser important per al balanç energètic del planeta. L'any 1954, Gilbert Plass va realitzar uns càlculs més sofisticats sobre l'absorció de la radiació infraroja, amb la qual cosa va determinar el gran efecte de la concentració de CO₂ sobre la temperatura del planeta. Encara ens quedava pendent, això no obstant, saber si el CO₂ s'acumulava a l'atmosfera o no. Finalment, a finals

dels anys cinquanta, Roger Revelle determinà que tan sols una part de les emissions de CO_2 són absorbides pels oceans i, el 1960, Charles D. Keeling constatà, a partir de mesures acurades de la concentració de CO_2 atmosfèric, que, efectivament, aquesta augmenta any rere any. Aquestes mesures es continuen fent avui dia a l'Observatori de Mauna Loa, Hawaii, i representen l'exemple més clar de l'empremta que els humans estem deixant en el planeta (Figura 1).

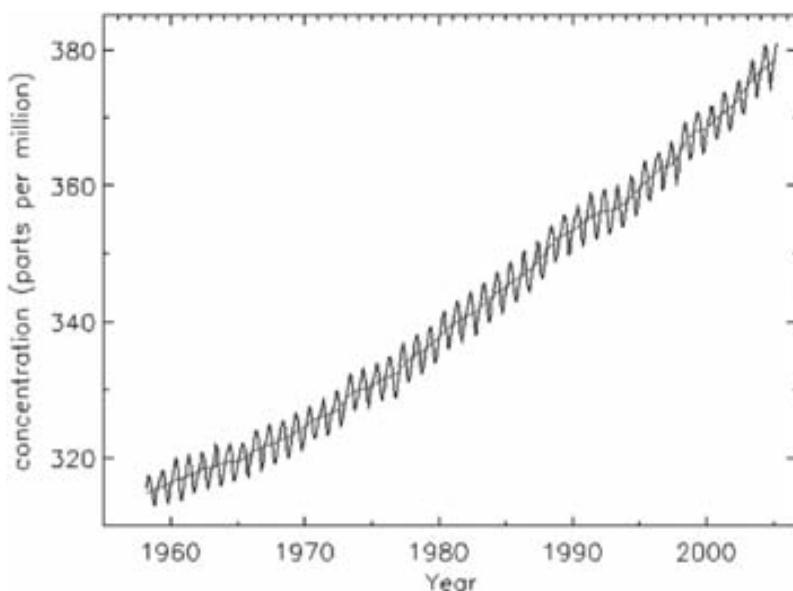


Figura 1. «Corba de Keeling». Evolució del CO_2 atmosfèric dels darrers 50 anys determinada a l'Observatori de Mauna Loa, Hawaii.

Quin és, doncs, als nostres dies, l'impacte d'aquest augment en la concentració de CO_2 ? En el quart informe de l'IPCC (2007) es conclou que «l'escalfament del sistema climàtic és inequívoc i, molt probablement, degut a les activitats humanes». Aquest informe representa el consens de més de 1200 experts i ha estat revisat per 2500 científics de fins a 130 països. Alguns dels senyals més clars del canvi climàtic són: 1) un augment de la temperatura mitjana global de $0,74\text{ }^\circ\text{C}$; 2) un augment del nivell del mar de 17 cm; 3) una disminució de la coberta de neu i de l'extensió de les glaceres; 4) un augment en la freqüència, intensitat i extensió d'esdeveniments climàtics extrems, com sequeres i ciclons

tropicals, i 5) una reducció del pH superficial de 0,1 unitats. I tots aquests canvis vénen determinats per l'increment dels gasos d'efecte d'hivernacle a l'atmosfera, en particular del CO₂. Per tant, la magnitud i velocitat dels canvis climàtics futurs dependrà, en bona mesura, de l'evolució de la concentració del CO₂ atmosfèric. Del que no hi ha dubte és que, per tal d'estabilitzar el clima, hem d'estabilitzar el CO₂ a l'atmosfera i això requereix reduir-ne les emissions.

L'evolució del CO₂ atmosfèric

La «corba de Keeling» mostra un augment de la concentració atmosfèrica de CO₂ d'uns 310 ppm l'any 1956 a les 380 ppm de l'actualitat. En els últims 25 anys, això representa un augment d'1,6 ppm de CO₂ per any, però la velocitat de canvi encara s'accelera més: en el període 2000-2006 aquest augment fou d'1,9 ppm CO₂/any.

Si ara volem anar més enrere en el temps, hem d'anar a buscar els testimonis de gel de l'Antàrtida i estudiar la composició de les bombolles d'aire que van quedar atrapades en el moment de formació d'aquest gel. A l'Antàrtida s'han obtingut testimonis de gel de més de 3000 m de fondària, que permeten reconstruir l'evolució de la concentració dels gasos durant els darrers 800.000 anys. Les concentracions de CO₂ en el passat geològic van oscil·lar entre 180 i 280 ppm, amb uns cicles d'alternança entre èpoques glacials i interglacials. Les concentracions actuals de CO₂ atmosfèric són del voltant de 380 ppm i, per tant, molt superiors a les experimentades durant els darrers centenars de milers d'anys. Més preocupant que aquest valor absolut és la velocitat a la qual aquesta concentració està augmentat. L'increment de CO₂ a l'atmosfera entre un període glacial i un d'interglacial era de 0,01 ppm/any, mentre que la taxa actual és d'1,9 ppm/any i, per tant, dos ordres de magnitud més ràpid, cosa que indica la gran acceleració dels canvis actuals.

Els testimonis de gel també han permès constatar que la temperatura varia en paral·lel a les concentracions de CO₂, i així s'ha pogut establir, de manera inequívoca, l'estret vincle entre el clima de la Terra i les variacions de CO₂.

El cicle oceànic del carboni. Mecanismes reguladors del CO₂ atmosfèric

Cada any els humans introduïm 8 Pg (P = peta = 10¹⁵, és a dir, 8 mil milions de tones) de carboni a l'atmosfera (en el període 2000 – 2006 fou de 9,1 Pg/any). D'aquests, 6,5 Pg corresponen a emissions per la

crema de combustibles fòssils i uns 1,5 Pg, a la desforestació. D'aquests 8 Pg emesos, només 3,2 Pg s'acumulen a l'atmosfera. Aleshores ens preguntem: on és la resta? Doncs, com que el balanç ha de quedar tancat, els 5 Pg restants han de ser absorbits pels oceans i els ecosistemes terrestres.

Els oceans tenen una gran importància en el procés d'emmagatzematge de CO_2 atmosfèric. Els oceans han passat d'estar pràcticament en equilibri amb l'atmosfera durant l'època preindustrial a ser actualment uns captadors nets de CO_2 . A més, gran part de tot el carboni del planeta es troba com a carboni inorgànic dissolt a les capes intermèdies i profundes de l'oceà, on s'han calculat uns reservoris de 37.000 Pg de C (unes 16 vegades més que a la biosfera terrestre, i unes 60 vegades més que a l'atmosfera).

Però, com regula l'oceà la concentració atmosfèrica del CO_2 ? Quins processos participen en la reducció d'aquest CO_2 ? L'intercanvi de CO_2 entre atmosfera i oceà té lloc a través d'una sèrie de processos físics, químics i biològics que resumeixo a continuació.

Bomba física o de solubilitat

Es tracta de la transferència de CO_2 des de la superfície fins a l'interior del mar en funció de la solubilitat del gas i la formació d'aigües profundes. Cal tenir en compte que la solubilitat de qualsevol gas és més gran en aigües fredes que en càlides. Pel que fa a la formació d'aigües profundes, primer hem d'entendre com funciona el sistema de circulació termohalina. Per explicar de manera molt simple què és la circulació termohalina ens hem d'imaginar el planeta com si estigués recorregut per una gran cinta transportadora que enllaça tots els oceans i redistribueix la calor de latituds equatorials a latituds més altes. Les aigües càlides i salines procedents del Carib són transportades cap a l'Atlàntic Nord on, en contactar amb les masses d'aire fred de l'Àrtic, es refreden, augmenten la seva densitat i quan arriben als mars de Groenlàndia i Noruega s'enfonsen i viatgen en fondària fins a arribar a l'Antàrtida. Allí es distribueixen cap als oceans Pacífic i Índic, on, circulant en superfície, tomben per Sud-àfrica per retornar cap a l'Atlàntic i així tancar el cicle. És important el fet que l'aigua superficial s'enfonsa només en uns llocs molt específics de les latituds altes de l'oceà (a l'Atlàntic Nord i a l'Antàrtida), a causa de l'augment de la seva densitat en aquests punts. Quan les aigües fredes i, per tant, riques en CO_2 , s'enfonsen, es retira una gran quantitat de CO_2 que està en superfície i que és transportat a les capes més profundes de l'oceà, on romandrà durant segles, fins i tot mil·lennis.

Bomba biològica

Aquí tenim dos processos que actuen en sentit contrari. Primer, tenim la fixació de C pels organismes marins a través de la fotosíntesi i, després, la transferència del material orgànic al fons del mar. Part de la matèria orgànica generada en superfície, no obstant això, és consumida pel zooplàncton o bé degradada pels bacteris i, per tant, només la matèria orgànica que s'escapa d'aquesta degradació i arriba a capes més profundes és realment efectiva a retirar CO₂ atmosfèric a escales llargues de temps. La matèria orgànica que arriba al sediment pot quedar aïllada de l'atmosfera durant centenars de milers d'anys

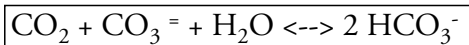
D'altra banda, la bomba del carbonat actua en sentit contrari, ja que s'allibera CO₂ durant la precipitació d'esquelets carbonatats per part d'alguns organismes marins. Per exemple, les algues coccolitoforals (com l'*Emiliana huxleyi*, principal responsable de la producció primària dels oceans) formen unes plaques carbonatades (els coccòlits). L'alga també fixa CO₂ en la fotosíntesi, però, d'altra banda, per formar aquesta closca carbonatada, allibera CO₂. Les diatomees, en canvi, fixen CO₂ per formar matèria orgànica, però no tenen el procés de retorn, ja que el seu esquelet està format per sílice en lloc de carbonat. Per tant, les diatomees són més eficients a retirar CO₂ atmosfèric. Atès el sentit oposat de fotosíntesi i formació d'esquelets carbonatats, l'efecte net de la bomba biològica sobre el CO₂ atmosfèric dependrà de l'eficàcia de cadascun dels processos esmentats.

L'eficàcia d'aquestes bombes es pot veure afectada per mecanismes diversos. Per exemple, la bomba de solubilitat queda afectada per canvis en la temperatura. Si els oceans s'escalfen, es redueix la solubilitat i no capten tant de CO₂. I si la circulació termohalina queda alentida, també es retira menys CO₂ atmosfèric cap a capes profundes. Pel que fa a la bomba biològica, és molt important la disponibilitat de nutrients, que és molt variable als oceans. D'una banda, hi ha grans extensions oceàniques oligotròfiques, amb baixes concentracions de nutrients essencials com el nitrogen i el fòsfor. D'altra banda, aquests nutrients poden ser molt elevats en algunes zones, com a l'oceà Austral. Ara bé, contràriament al que s'esperaria, en aquests mars australs la productivitat és molt baixa. Per explicar aquesta situació anòmla (es parla d'àrees HNLC per les sigles en anglès High-Nutrient, Low-Chlorophyll), John Martin va proposar que la baixa productivitat en aquestes aigües tan riques en nutrients era deguda a la manca d'un micronutrient essencial, el ferro (Fe). El Fe arriba als oceans, en gran part, via atmosfèrica, per la deposició de pols dels deserts, rica en metalls. La zona de l'Antàrtida queda fora de les trajectòries principals de transport d'aquesta pols procedent dels continents.

S'han fet experiments de fertilització del mar amb Fe, i s'ha demostrat que, efectivament, l'addició de Fe provoca un augment de la productivitat. Aquest mecanisme s'ha proposat per explicar les baixes concentracions de CO₂ enregistrades durant les èpoques glacials a través d'una major disponibilitat de Fe durant aquests períodes que portaria a un augment de la productivitat i, per tant, a una disminució del CO₂ atmosfèric. De fet, algunes empreses privades ja han proposat de fertilitzar l'oceà amb Fe com a estratègia de mitigació de les elevades concentracions actuals de CO₂. No obstant això, el que aquests experiments no mostren d'una manera clara és que aquest augment de la productivitat es tradueixi en un augment en el transport del carboni fixat cap a l'interior de l'oceà, on quedaria retirat de la circulació. A més, cal tenir en compte l'impacte ecològic que l'addició massiva de Fe podria causar en les comunitats marines (per exemple, un augment de la productivitat també implica un major consum d'oxigen). I, finalment, alguns estudis apunten que per fertilitzar un 20 % de l'oceà farien falta 5500 vaixells carregats de Fe cada l'any, i amb tot això només s'aconseguiria una disminució de 15 ppm del CO₂ atmosfèric.

Processos químics

L'equilibri químic àcid-base del sistema carbonat constitueix un sistema tamponador molt eficient davant de petits canvis en la concentració de CO₂ dissolt en l'aigua de mar. De fet, és gràcies a aquest sistema tamponador que els oceans poden absorbir deu vegades més CO₂ del que absorbirien en absència d'aquestes reaccions. I això és així perquè el CO₂ dissolt en l'aigua no existeix com a tal, sinó que es dissocia per donar lloc a bicarbonat (HCO₃²⁻), carbonat (CO₃²⁻) i protons (H⁺). L'absorció de CO₂ per part dels oceans fa que augmenti la quantitat de protons, els quals reaccionen amb els ions carbonat i donen lloc al bicarbonat, que és l'espècie química majoritària. Com a resultat, l'absorció de CO₂ en l'aigua de mar es tradueix en una reducció de la concentració d'ió carbonat, segons l'expressió:



A mesura que els oceans van absorbint CO₂ i aquest va reaccionant amb CO₃²⁻, la seva capacitat tamponadora va disminuint, perquè cada vegada quedarà menys CO₃²⁻ disponible per a la reacció. Juntament amb la disminució de la capacitat d'absorció dels oceans, aquest augment en la concentració de CO₂ dissolt en produeix una progressiva acidificació (disminució del pH). Actualment s'ha calculat que els oceans han patit

ja una disminució de 0,1 unitat de pH. Sembla poc, però representa un augment de 30 vegades la concentració de protons, ja que el pH es mesura en escala logarítmica: $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$.

I quines seran les conseqüències d'una progressiva acidificació dels oceans? Amb l'acidificació, i la reducció de l'ió carbonat, els organismes que formen un esquelet carbonatat (com per exemple els coralls, mol·luscos, eriçons o pteròpodes) tindran problemes per calcificar. Si la concentració de carbonats disminueix als mars, el seu estat de saturació (Ω) també disminueix. Així, parlem d'aigües saturades respecte de l'ió carbonat quan aquest es troba en concentracions suficients per afavorir la formació de les closques i esquelets dels organismes. Cada espècie té un grau de saturació específic (concentració de carbonat per sota de la qual no poden construir el seu esquelet). Per exemple, gran part dels coralls viuen en aigües amb valors de Ω superiors a 3. Les previsions per al futur, però, indiquen que l'estat de saturació dels carbonats anirà disminuint i, per tant, la concentració de carbonat no serà suficient a fi que aquests organismes calcifiquin. Uns dels organismes que primer poden resultar afectats són els pteròpodes, organismes molt abundants a l'oceà Austral i que formen la base de la dieta del *krill*, aliment principal de balenes i foques. Altres organismes que en quedaran afectats són les algues coccolitoforals, responsables de gran part de la producció primària en els oceans. En aquest cas, la forma cristal·lina del carbonat precipitat per aquestes algues és la calcita, mentre que coralls i pteròpodes precipiten aragonita, forma cristal·lina del carbonat més fràgil i sensible a la dissolució.

Altres conseqüències d'una disminució del pH seran sobre la química de nutrients i toxines. És el cas del coure, per exemple, que actua com a nutrient quan es troba complexat, però que és tòxic en la seva forma lliure, la qual augmenta a pH més baixos. Altres exemples serien canvis en la fisiologia i reproducció d'animal marins: acidosi de teixits, síntesi de proteïnes, mortalitat de petits crustacis, etc.

La nostra recerca en els oceans

Per acabar, faré una breu llista dels estudis que portem a terme a l'Institut de Ciències del Mar que fan referència als temes esmentats.

1. *Experiments de manipulació per simular condicions futures.* Hem instal·lat experiments per manipular el pH en aquaris, a fi d'exposar diferents espècies de coralls a un rang variable de pH. Amb aquest experiment volem estudiar els efectes de la disminució de pH en la supervivència dels organismes que formen esquelets carbonatats.

2. *Monitoratge de la variabilitat actual.* Malgrat la repercussió dels canvis del pH en els ecosistemes marins, hi ha encara molt poques dades de variabilitat d'aquest paràmetre, tant temporal (cicles de dia/nit, cicles estacionals, interanual...) com espacial. Hem instal·lat un sistema que mesura el pH en continu a una fondària de 20 m a les illes Medes, una zona especialment sensible per la presència de coral·ligen.

3. *Reconstruccions de pH en el passat.* Fem estudis per reconstruir el pH de les aigües de mar en el passat, basant-nos en el mostratge de testimonis de coralls massius, tipus *Porites*. Aquests organismes són ideals per estudiar la variació del clima en el passat (els últims segles) i detectar canvis en el pH, la salinitat o la temperatura, ja que creixen 1 cm cada any i arriben a fer 3-4 m de diàmetre.

Resumint, doncs, sabem que la concentració de CO₂ a l'atmosfera ha augmentat un 40 % respecte dels valors preindustrials (de 270 a 380 ppm). Els oceans han absorbit ja la meitat de les emissions derivades de la crema de combustibles fòssils, però la seva capacitat és limitada. Juntament amb l'escalfament global, l'absorció d'aquest CO₂ per part dels oceans està modificant la química dels oceans, amb conseqüències greus per a un gran nombre d'organismes marins.

No obstant això, tot i saber que el CO₂ atmosfèric està augmentant, que la temperatura augmenta, que el nivell del mar puja, que els oceans s'acidifiquen, etc., no tenim clar com seran exactament aquests canvis (com de ràpid pujarà el nivell del mar o quins ecosistemes seran els més afectats per una disminució del pH) i quines regions del globus en quedaran més afectades, i això paralitza moltes accions. Malgrat aquestes incerteses, no podem esperar a comprovar la severitat d'aquests canvis i a veure com es van desenvolupant. Tal com ja va dir R. Revelle el 1960, «Els homes estan actualment duent a terme un gran experiment geofísic», o més recentment Socolow (2005), «La humanitat està desenvolupant un experiment incontrolat sobre el funcionament del món». Hem de ser conscients que aquests experiments podrien tenir conseqüències indesitjades per a nosaltres mateixos.