

Sostenibilitat i materials: explorant els lligams entre producció d'energia i nous materials

Sustainability and materials: exploring the relationship between energy production and new materials

Fernando Sapiña Navarro / Universitat de València. Parc Científic. Institut de Ciència dels Materials



resum

Els problemes ambientals tenen l'origen en les activitats que ens porten a satisfer les nostres necessitats d'aliments, energia i materials. I, des d'aquest punt de vista, hem d'evitar la contínua degradació dels ecosistemes i de la seua capacitat per proporcionar-nos béns i serveis que són necessaris per a la nostra supervivència. Un dels reptes més rellevants que tenim en aquests moments és fer una transició des d'un sistema energètic basat en combustibles fòssils a un sistema basat en fonts d'energia renovables. L'aprofitament d'aquestes fonts renovables comporta fer ús de nous materials constituïts per elements que, fins ara, han sigut poc emprats. Aquesta situació provoca, a curt termini, problemes de subministrament que poden afectar la implantació d'aquestes noves tecnologies. Però també comporta problemes a llarg termini relacionats amb l'accessibilitat d'aquests elements.

paraules clau

Canvi climàtic, fonts renovables d'energia, nous materials, elements crítics.

abstract

The environmental problems have its origins in the activities that bring us to satisfy our needs of aliments, energy and materials. And, from this point of view, we have to avoid the continuous degradation of the ecosystems and of its capacity to provide us goods and services that are necessary for our survival. One of our most important challenges in these moments is the promotion of a transition from an energy system based in fossil fuels to a system based in renewable energy sources. The exploitation of these renewable sources needs the use of new materials constituted by elements that, up to now, have been little employed. This situation causes, in the short term, problems of supply that can affect to the implantation of these new technologies. But it also comports long-term problems related with the accessibility of these elements.

keywords

Climatic change, renewable energy sources, new materials, critical elements.

Benvinguts a l'antropocè

Benvinguts a l'antropocè és un curt de tres minuts de durada que repassa els últims dos-cents cinquanta anys de la història de la humanitat, des del començament de la revolució industrial fins a la cimera de Rio+20 (*Welcome to the anthropocene*, 2012; Crutzen i Stoermer, 2000). En ell es reflecteix de quina manera la humanitat s'ha convertit, en

aquest període, en una força global que ha alterat profundament els principals cicles biogeoquímics de la Terra.

Durant la major part de la història, les nostres activitats van provocar impactes sobre el medi ambient, però, en conjunt, van ser una força insignificant en la dinàmica de la Terra. Fins que, cap a l'any 1750, començarem a fer un ús més intensiu dels

combustibles fòssils. La població mundial va augmentar gràcies a la disponibilitat de més quantitat d'aliments i als avenços en higiene i salut, i va passar dels mil milions del 1800 als més de set mil milions de l'actualitat (i continua creixent).

La magnitud, l'escala espacial i la velocitat dels canvis induïts per les nostres activitats actualment no tenen precedents en tota

la història. Pel que fa a la magnitud, les nostres activitats igualen o sobrepassen les forces naturals en diversos cicles biogeoquímics. Pel que fa a l'escala espacial, les nostres activitats alteren de forma global tots els components del planeta. I, pel que fa a la velocitat dels canvis, aquests es manifesten a una velocitat molt més gran que els canvis d'origen natural. El problema de la capa d'ozó, l'augment de la concentració de diòxid de carboni a l'atmosfera o l'enorme ritme d'extinció d'espècies són mostres d'aquestes alteracions.

processos tenen uns límits ben definits, caracteritzats per un número. D'aquests set, tres representen processos en els quals el fet de sobrepassar el límit desencadenaria canvis profunds en el funcionament de la Terra. Aquests processos són el canvi climàtic, l'acidificació dels oceans i la disminució de la capa d'ozó. En els altres quatre processos, aquests límits representen el començament d'una degradació irreversible. Parlem de la pèrdua de biodiversitat, de la contaminació per nitrogen i per fòsfor i de la

l'any (el valor límit suggerit és deu vegades inferior). En el cas de la contaminació per nitrogen, som responsables de la fixació de 121 milions de tones l'any (el límit suggerit és tres vegades i mitja inferior). I, en el cas del canvi climàtic, la concentració de diòxid de carboni és de 390 ppm (el límit proposat és de 350 ppm).

Entre tots aquests processos, aquell que ha rebut més atenció és el canvi climàtic. De fet, a l'informe anual sobre riscos globals del Fòrum Econòmic

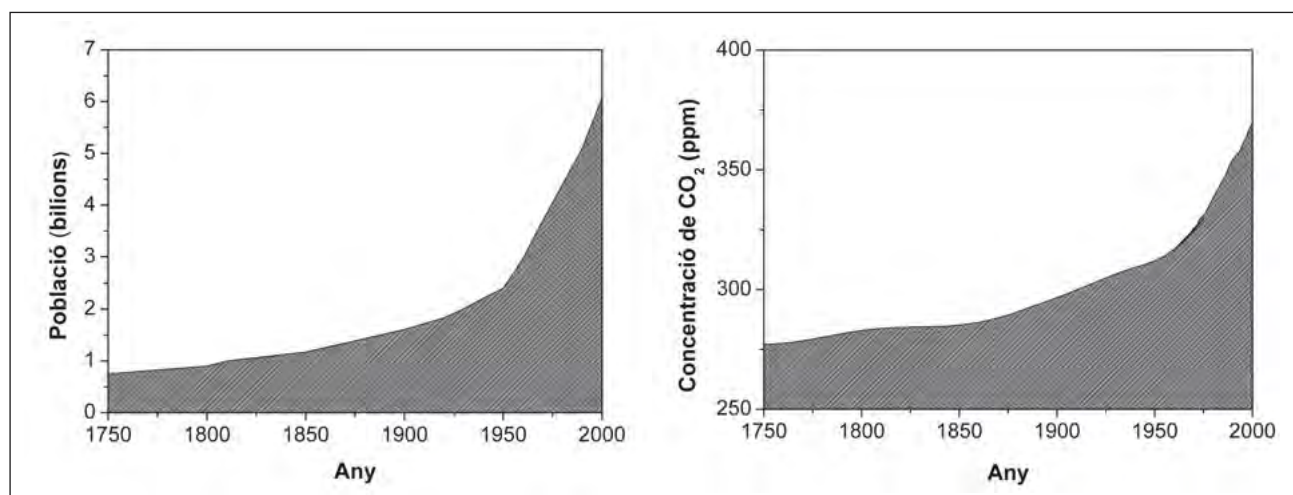


Figura 1. El canvi global és el conjunt de les transformacions que s'estan produint en el medi ambient a conseqüència de les nostres activitats. El creixement de la població humana (fig. 1a) i el creixement dels recursos necessaris per mantenir a aquesta població es mantenen gràcies a una sèrie d'activitats que transformen les terres, alteren els principals cicles biogeoquímics i afigen o eliminen espècies en molts ecosistemes. Aquests components primaris del canvi global interaccionen entre si i poden provocar, a més, altres alteracions en el funcionament de l'ecosistema global, com és el canvi climàtic, que té l'origen en l'augment de les concentracions dels gasos d'efecte hivernacle a l'atmosfera, com el diòxid de carboni (fig. 1b). Font: Crutzen i Stoermer (2012).

Processos crítics planetaris

Fa uns anys, un equip internacional va estudiar els processos biogeoquímics que podrien alterar l'estat del sistema Terra. Van determinar que hi ha nou processos d'aquest tipus i van tractar d'establir per a cada un d'ells els límits dintre dels quals no hi hauria grans canvis. Dit d'una altra manera, van establir els límits de funcionament sostenible del sistema Terra (Foley, 2010; Rockström et al., 2009b).

En particular, aquest equip va determinar que set d'aquests

disminució del subministrament d'aigua dolça. Finalment, tenim dos processos que encara no han estat estudiats en profunditat: la contaminació per aerosols i la contaminació química global.

La comparació entre els límits determinats i els valors actuals d'aquests paràmetres indiquen que ja s'han sobrepassat en tres processos: pèrdua de biodiversitat, contaminació per nitrogen i canvi climàtic. En el cas de la pèrdua de biodiversitat, la velocitat actual d'extinció és de cent per milió d'espècies

Mundial de l'any 2013, els dos riscos que en un període de deu anys tenen més probabilitat de produir-se i més impacte són l'augment de les emissions de gasos d'efecte hivernacle i la falta d'adaptació al canvi climàtic (Howell, 2013). A més, es percep com a més crítica la falta d'adaptació al canvi climàtic. Per tant, per als experts que participaren a l'enquesta en la qual es basa l'informe, la qüestió ja no és si el clima està o no està canviant: la qüestió és quant canviarà el clima i a quina velocitat.

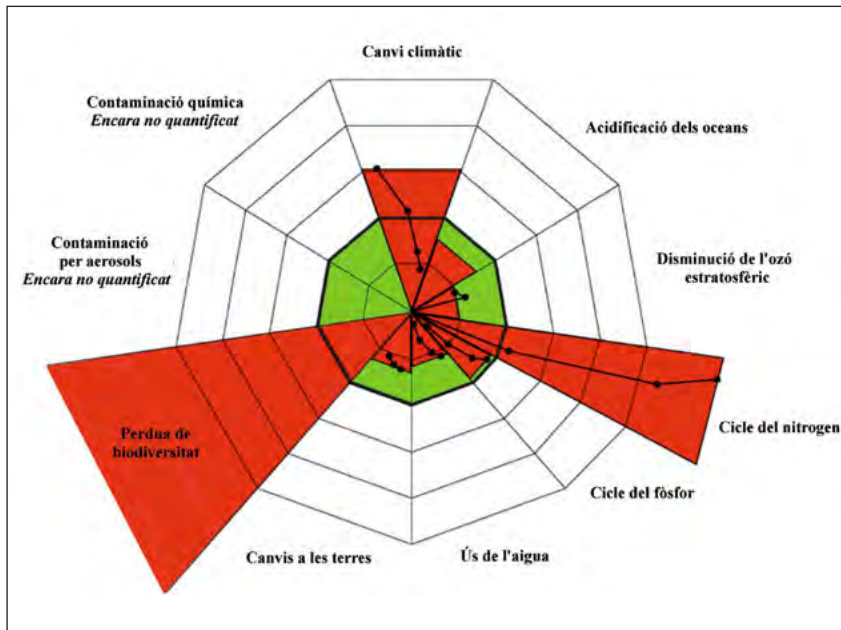


Figura 2. Les zones verdes representen els límits per a cadascun dels processos crítics planetaris. Les zones vermelles indiquen quina és l'estimació dels valors actuals dels paràmetres associats a cada procés crític. En tres processos, s'han sobrepassat els límits proposats (pèrdua de biodiversitat, canvi climàtic i contaminació per nitrogen). Font: Rockström (2009b).

Solucions tecnocientífiques al canvi climàtic

Una part de les solucions al problema del canvi climàtic són tecnocientífiques: cal reduir les emissions de gasos d'efecte hivernacle i cal explotar les fonts d'energia renovables. L'any 2004 es va publicar a la revista *Science* un article que es va convertir en referència obligada d'aquest tema (Pacala i Socolow, 2004; Socolow i Pacala, 2006). El que plantejaren els seus autors és un escenari de manteniment de les emissions de gasos d'efecte hivernacle durant els propers cinquanta anys per tal que la concentració de diòxid de carboni a l'atmosfera no arribi a duplicar els nivells preindustrials. I, després, analitzaren distintes tecnologies existents tot determinant el seu potencial per contribuir al manteniment de les emissions de diòxid de carboni en el futur. La conclusió a la qual arribaren és que, amb una acció decidida, tenim marge no sols per establir les emissions durant els

pròxims cinquanta anys, sinó que podríem, fins i tot, reduir-les...

La dieta tecnològica

El desenvolupament de noves tecnologies energètiques planteja, per la seua part, uns altres problemes relacionats amb la disponibilitat dels elements en els quals estan basades. Pensem que, fa uns cent anys, la dieta tecnològica, la diversitat de materials utilitzats, consistia sobretot en materials naturals, junt amb uns pocs metalls. Durant una gran part de la història de la humanitat, la major part dels materials s'ha emprat tal com la naturalesa els proporcionava: pedra, fusta, argila, palla, etc. Als Estats Units, el primer any en el qual la producció de minerals industrials va ser més gran que la producció de fusta fou el 1927. I el primer any en el qual la producció primària de metalls va ser més gran que la producció de fusta va ser el 1941.

Durant el segle XIX es va descobrir la major part dels elements que conformen la taula periòdica.

Però molts d'ells no van ser res més que curiositats de laboratori fins que, fa unes dècades, vam començar a emprar-los. Cap al 1900, la dieta tecnològica incloïa una dotzena d'elements. Actualment, emprem materials que contenen elements d'una gran part de la taula periòdica. La nostra dieta tecnològica s'ha fet molt més variada, molt més omnívora en tots els àmbits (Greenfield i Graedel, 2013).

En aquests moments, la preocupació pel canvi climàtic fa que estiguen desenvolupant-se noves formes de generació, emmagatzematge i utilització d'energia, les quals requereixen de nous materials integrats per elements fins ara poc emprats. L'energia fotovoltaica ha estat basada en el silici, però les tecnologies fotovoltaïques avançades fan ús d'elements com el cadmi, el gal·li, el germani i el tel·lur. El liti i el lantà són emprats en bateries d'altres prestacions, essencials per als vehicles elèctrics. Als motors elèctrics i als generadors d'electricitat que empen vehicles híbrids i elèctrics i turbines eòliques, s'hi empen imants molt potents, els quals contenen elements de les terres rares, com neodimi o disprosi (Simmons, 2011).

Elements crítics per al sector energètic

La implementació a gran escala d'aquestes tecnologies té el potencial de canviar el sistema energètic per fer-lo molt poc dependent dels combustibles fòssils. Però, atès que aquestes són tecnologies intensives en l'ús de materials, aquest procés requerirà de grans quantitats d'elements que, a hores d'ara, s'extrauen, es refinen i es comercialitzen en quantitats relativament petites. Per això es va adoptar el terme *element crític del sector energètic* (ECSE) per refe-

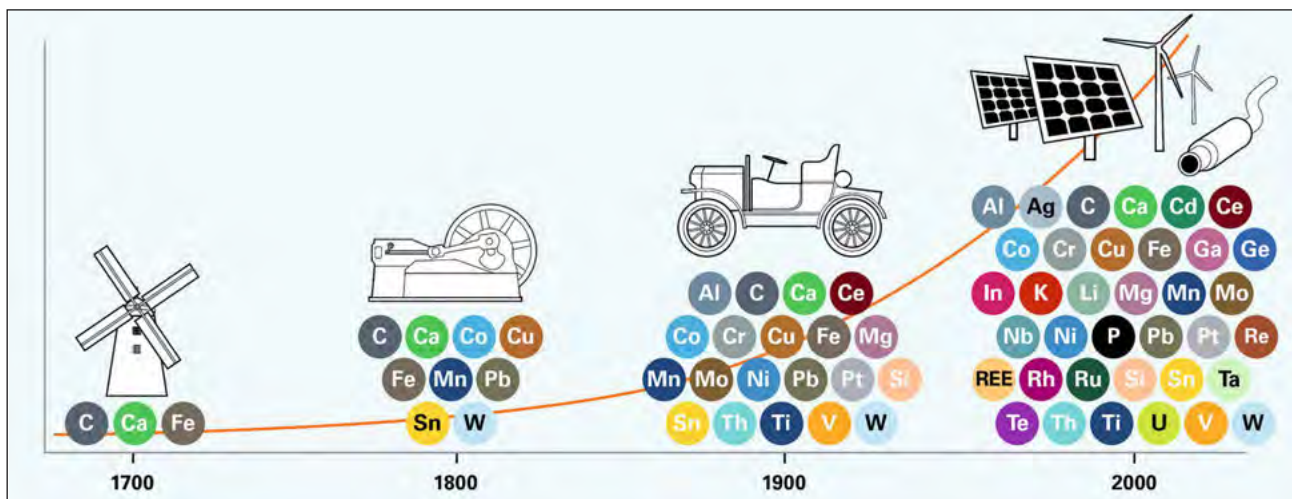


Figura 3. A la primèria del segle XVIII, la humanitat explotava, com a fonts d'energia, el sol, el vent, la gravetat, el carbó, la fusta i els músculs d'animals. Les màquines produïdes per capturar aquesta energia i les eines necessàries per construir-les empraven materials que eren accessibles localment, com ara la fusta, el carbó i el ferro. La situació, actualment, és molt diferent. El rang de materials i, per tant, d'elements emprats en la producció d'energia cobreix una bona part del sistema periòdic, des d'elements molt utilitzats, com el coure, que és probablement el més important de l'era elèctrica, fins a elements poc emprats, com el tel·lur, que s'usa en les noves tecnologies fotovoltaïques. Font: Simmons (2011).

rir-nos a un grup d'elements que, actualment, són fonamentals per a les noves tecnologies relacionades amb l'energia, els quals, a hores d'ara, no són produïts en grans quantitats i, per tant, no tenen uns mercats ben establerts i estables (*The energy critical elements...*, 2011).

Hi ha diverses raons per les quals un element es considera un ECSE. D'una banda, tenim elements que són intrínsecament poc abundants o que no s'han concentrat de forma important per processos geoquímics (és el cas del reni i el germani). Hi ha també raons geopolítiques, si parlem d'elements que es produeixen en uns pocs països (és el cas del platí i el pal·ladi, produïts per Sud-àfrica i Rússia). Tenim elements que, a hores d'ara, no s'extrauen de menes pròpies, sinó que són produïts com a subproductes en el procés d'extracció d'altres elements, com és el cas del tel·lur. Finalment, hi ha altres elements que són potencialment tòxics, que s'obtenen en formes que són ambientalment inacceptables o que no són reciclats.

El cas de les terres rares

Les terres rares són un conjunt de quinze elements que comprenen l'itri i catorze dels quinze elements lantànids (tots els isòtops del prometi són radioactius i tenen vides mitjanes curtes, per la qual cosa aquest element no es troba a la natura i no té aplicacions industrials rellevants). Aquests elements tenen un impacte important en la nostra vida diària: en el procés d'obtenció de combustibles a partir del petroli, s'empen catalitzadors que contenen terres rares; els convertidors catalítics per a la reducció de les emissions de gasos contaminants dels cotxes empen terres rares; els xicotets imants emprats en els auriculars i altaveus dels telèfons mòbils i en els discos durs dels ordinadors contenen terres rares.

Aquests elements, a més, desenvolupen un paper important en moltes noves tecnologies energètiques. El lantà es va emprar en bateries de níquel-hidrur metàl·lic. Aquestes bateries foren fonamentals per al desenvolupament dels vehicles

híbrids i elèctrics des del final dels anys noranta del segle XX fins que van substituir-se en aquesta aplicació per bateries de liti.

El desenvolupament de nous imants permanents més potents ha estat basat en les propietats magnètiques dels compostos SmCo_5 i $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. I aquests imants han trobat aplicacions en turbines eòliques i en motors elèctrics. En les noves turbines eòliques que empen aquests imants, s'estima que contenen uns 200 quilos de neodimi per MW de capacitat de generació. En el cas dels motors elèctrics, un vehicle híbrid com el Toyota Prius conté 1 quilò de neodimi.

Les terres rares són elements relativament abundants a l'escorça terrestre, malgrat el que dona a entendre el seu nom. El ceri, per exemple, és tan abundant com el coure. Són constituents d'una varietat d'òxids que s'anomenen *terres rares* (*terra* era el nom antic que es donava als òxids), i aquest és l'origen del nom d'aquest conjunt d'elements. Es troben normalment junts, siga en dipòsits generats per meteorització de pegmatites (unes roques

ígnies), siga en alguns tipus d'argiles.

La producció mundial d'aquests elements, l'any 2010, va ser de 133.600 tones. Les reserves estimades (és a dir, els dipòsits que poden ser explotats actualment de forma econòmicament viable) són de 110 milions de tones. Per tant, el temps de vida mitjana de les reserves és de vuit-cents vint-i-tres anys, la qual cosa permet un augment important de la producció abans de tindre problemes derivats d'una relació reserves/producció baixa.

L'any 2010, la Xina va produir el 97 % de totes les terres rares; l'Índia, el 2 %; el Brasil, el 0,4 %, i la resta del món, el 0,26 %. És aquesta posició extremament dominant de la Xina sobre el subministrament el que preocupa els responsables de polítiques de distints països. Aquesta situació és molt recent. La major part de la producció de terres rares fins al final dels anys vuitanta del segle xx es duia a terme als Estats Units en una única explotació: la mina de Mountain Pass (Califòrnia). Però a la Xina van posar-se en marxa moltes xicotetes explotacions, moltes d'elles quasi artesanals, no registrades i no regulades. La pressió dels baixos preus dels productes d'aquestes explotacions, junt amb les fortes inversions requerides per complir amb la legislació ambiental dels Estats Units, va fer que el procés no fóra econòmicament viable, de manera que la mina de Mountain Pass va tancar l'any 2002 (Simmons, 2011; *The energy critical elements...*, 2011; Du i Graedel, 2011; Du i Graedel, 2013; Jacoby i Jiang, 2010).

La Xina va anunciar, el juliol de 2010, una reducció del 40 % en la seua quota d'exportació de terres rares. En unes setmanes, el preu d'exportació del neodimi es va multiplicar per tres i, el novembre de 2011, era set vegades

des del juny de 2010. Les raons darrere d'aquesta retallada són els esforços del Govern xinès per millorar la situació ambiental, un creixement important de la demanda domèstica i el progressiu desenvolupament de la indústria xinesa de transformació d'aquests elements en productes acabats.

seues característiques és que, en general, no es reciclen, siga perquè s'empren en aplicacions que fan que el reciclatge siga inherentment complicat, siga perquè no hi ha tecnologies de reciclatge, o bé pel seu ús dispers, la qual cosa fa difícil la recollida selectiva de grans quantitats de material.

Platinum Group Elements																		Other ECEs																																																																																				
Rare Earth Elements																		Photovoltaic ECEs																																																																																				
1 H	2 He	3 Li	4 Be	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	11 Na	12 Mg	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Figura 4. Possibles elements crítics per al sector energètic. Les terres rares inclouen els elements lantànids (amb les excepcions del prometi, element radioactiu, i de l'holmi, l'erbi i el tuli, que no tenen encara usos en aquest sector), així com l'escandi i l'itri. Els elements del grup del platí inclouen el ruteni, el rodi, el pal·ladi, l'osmi, l'iridi i el platí. Altres elements rellevants són el gal·li, el germani, el seleni, l'indi i el tel·lur, els quals són elements semiconductors amb aplicacions en tecnologies fotovoltaïques. La llista es completa amb el cobalt, l'heli, el liti, el reni i la plata. Font: The energy critical elements... (2011).

La importància del disseny de materials i productes

La indústria i la tecnologia moderna han evolucionat per emprar una paleta cada vegada més variada d'elements. I cal adonar-se que, tant en el cas dels elements molt emprats (Cu, Al, etc.) com en el cas dels elements poc emprats (Ge, Nd, etc.), tractem amb recursos inherentment no renovables. En tots dos casos, un dels reptes de la sostenibilitat està en la gestió dels elements que ja estan en ús, amb la fi de reciclar la seua totalitat una vegada que els productes que els contenen acaben el seu cicle de vida.

En el cas dels elements que s'han incorporat recentment a la paleta tecnològica, una de les

Aquesta darrera situació es planteja també en el cas d'altres elements, com ara l'or: a Sud-àfrica s'explota un dipòsit d'aquest element que conté 5 grams d'or per tona de mineral, el qual es troba a més de tres quilòmetres sota terra; a les plaques dels ordinadors, hi ha un dipòsit d'or que conté 200 grams d'or per tona i que ja es troba a la superfície terrestre, però el reciclatge d'aquestes plaques és molt baix.

Amb una perspectiva de limitacions de materials cada vegada més freqüents, sembla necessari que qualsevol equip de desenvolupament de productes considere, a l'etapa del disseny dels mateixos, les expectatives de

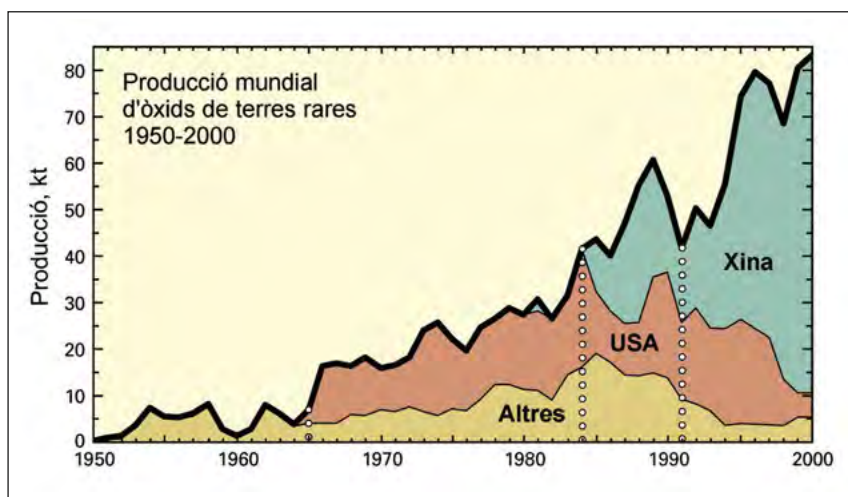


Figura 5. Producció mundial d'òxids de terres rares entre els anys 1950 i 2000, en milers de tones (kt). El mineral monazita va ser la principal font d'aquests òxids fins que, l'any 1964, va començar l'explotació de la mina de Mountain Pass (Califòrnia). Des del 1985, la producció xinesa va augmentar de forma espectacular, mentre que va disminuir la dels Estats Units. Font: Du i Graedel (2011).

subministrament i demanda de materials. En particular, una de les empreses que s'ha enfrontat a un problema d'aquest tipus és General Electric, una de les principals companyies productores de turbines per a motors d'avions (Greenfield i Graedel, 2013). Durant la dècada dels anys noranta del segle xx, General Electric Aviation va reconèixer que l'increment de la demanda de

reni per a superaliatges estava creixent, però que el subministrament d'aquest metall no ho feia, de forma que, en pocs anys, s'enfrontaria a un problema greu. Per aquesta raó, va llançar un programa de reducció de l'ús de reni que va centrar-se en quatre estratègies: reversió, recuperació, reciclatge i reducció. Les tres primeres consisteixen a aprofitar materials que contenen reni i que

es generen en diversos passos del cicle de la vida de les turbines: residus de les operacions de fosa de l'aliatge (reversió), residus generats en el procés de manufactura de les peces (recuperació) o les turbines mateixes quan s'ha acabat la seua vida útil (reciclatge). D'altra banda, l'empresa va dur a terme un extens programa d'investigació que li va permetre desenvolupar un nou superaliatge amb les mateixes propietats que l'original, però emprant molt menys reni (reducció).

Conclusions

L'1 de gener de 2005 va començar la Dècada de l'Educació per al Desenvolupament Sostenible, instituïda per les Nacions Unides. L'objectiu d'aquesta iniciativa és que els futurs ciutadans siguin conscients dels greus problemes ambientals i socials als quals han d'enfrontar-se i que estiguen preparats per prendre decisions fonamentades per abordar-los. Uns anys després, el 2009, es va convocar una cimera a Copenhaguen amb la finalitat de limitar les emissions de gasos d'efecte hivernacle. L'acord va ser insuficient, segons les opinions dels experts, la qual cosa va ressaltar encara més la importància de la iniciativa de les Nacions Unides.

Un aspecte en el qual s'ha de posar una especial atenció a l'hora de parlar de sostenibilitat és el de la complexitat. En aquesta situació d'emergència planetària, els distints problemes ambientals i socials estan interrelacionats. Si no podem amb el canvi climàtic, no podem amb la seguretat alimentària. Si no podem amb la seguretat alimentària, no podem amb la seguretat de l'aigua. Si no podem amb la seguretat de l'aigua, no podem amb la pobresa. Si no podem amb la pobresa, no podem amb la disparitat i la desigualtat econò-

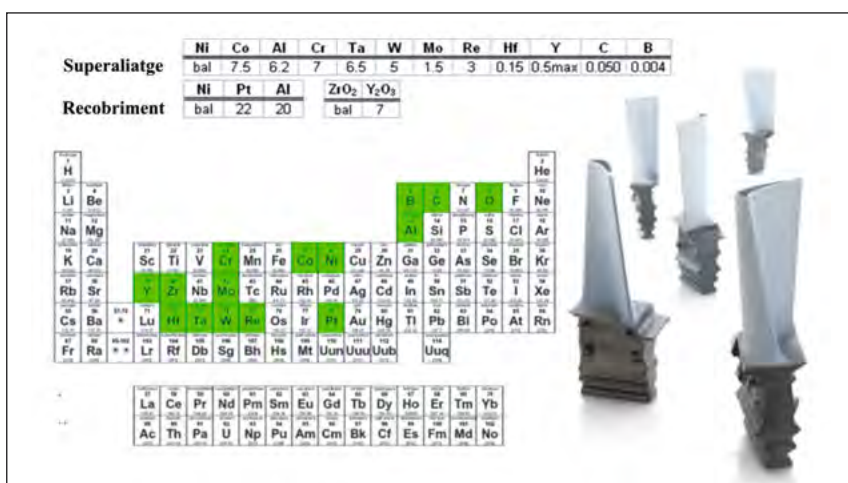


Figura 6. Elements emprats en un superaliatge modern per a turbines i en el recobriments que actua com a barrera tèrmica. El superaliatge consta de níquel amb cobalt, crom, tàntal, alumini, reni, molibdè, hafni i itri, junt amb quantitats xicotetes de carboni i bor. El recobriments que actua com a barrera tèrmica consta d'una primera capa d'ancoratge (un aliatge de níquel amb platí i alumini) i una altra capa d'un material ceràmic (òxid de zirconium amb itri). Font: Greenfield i Graedel (2013).

mica. Si no podem amb la disparitat i la desigualtat econòmica, no podem amb el canvi climàtic... Un objectiu de l'educació per al desenvolupament sostenible és transmetre aquesta complexitat i el fet que abordar un problema ambiental i social requereix també preveure les possibles conseqüències de les accions considerades en altres problemes ambientals i socials.

S'estima que, per al 2030, serà necessari augmentar la producció d'aliments en un 50 % i la demanda d'aigua associada, en un 30-40 %. Però, a més, la demanda d'energia augmentarà un 40 %, la qual cosa provocarà un augment addicional de la demanda d'aigua. S'estima que el 75 % de l'augment de la demanda d'energia fins al 2030 es cobrirà amb combustibles fòssils (sobretot, amb carbó). Aquests números ens indiquen la necessitat de fer canvis radicals en els usos de l'aigua i d'explorar noves fonts d'aliments i d'energia per cobrir aquesta demanda, al mateix temps que limitar els impactes ambientals associats a aquestes noves activitats. En aquest cas, es presenta entre biocombustibles i alimentació: la terra cultivada per obtenir biocombustibles no pot emprar-se per produir aliments.

En aquest article, hem explorat els lligams entre noves fonts d'energia i nous materials. Un dels reptes més rellevants que hi ha en aquests moments és fer una transició des d'un sistema energètic basat en combustibles fòssils a un sistema basat en fonts d'energia renovables. Les noves tecnologies desenvolupades per a l'aprofitament d'aquestes fonts renovables requereixen nous materials, constituïts per elements que, fins ara, han sigut poc emprats. Però l'accés als elements que formen aquests materials plantegen problemes ambientals i de subministrament,

així com problemes a més llarg termini relacionats amb el fet que, a l'igual dels elements més emprats, aquests són recursos no renovables, amb els seus propis problemes ambientals i de sostenibilitat.

Referències

- CRUTZEN, P. J.; STOERMER, E. F. (2000). «The "anthropocene"». *Global Change Newsletter*, núm. 41, p. 17-18.
- DU, X.; GRAEDEL, T. E. (2011). «Global in-use stocks of the rare earth elements: a first estimate». *Environmental Science and Technology*, núm. 45, p. 4096-4101.
- (2013). «Uncovering the end uses of the rare earth elements». *Science of the Total Environment*, núm. 461-462, p. 781-784.
- FOLEY, J. (2010). «Boundaries for a healthy planet». *Scientific American*, núm. 302, p. 54-59.
- GREENFIELD, A.; GRAEDEL, T. E. (2013). «The omnivorous diet of modern technology». *Resources, Conservation and Recycling*, núm. 74, p. 1-7.
- HOWELL, L. (ed.) (2013). *Global risks 2013*. 8a ed. Ginebra: World Economic Forum.
- JACOBY, M.; JIANG, J. (2010). «Securing the supply of rare earths». *Chemical and Engineering News*, vol. 88, núm. 35, p. 9-12.
- PACALA, S.; SOCOLOW, R. (2004). «Stabilization wedges: solving the climate problem for the next 50 years with current technologies». *Science*, núm. 30, p. 968-972.
- RITTER, S. K. (2012). «Forging a better supply chain». *Chemical and Engineering News*, vol. 90, núm. 26, p. 12-18.
- ROCKSTRÖM, J. [et al.] (2009a). «A safe operating space for humanity». *Nature*, núm. 461, p. 472-475.
- (2009b). «Planetary boundaries: exploring the safe operating

space for humanity». *Ecology and Society*, vol. 14, núm. 2, art. 32.

- SIMMONS, J. [et al.] (2011). *Materials critical to the energy industry: An introduction*. Augsburg: University of Augsburg.
- SOCOLOW, R.; PACALA, S. (2006). «A plan to keep carbon in check». *Scientific American*, núm. 295, p. 50-55.
- The energy critical elements: Securing materials for emerging technologies* (2011). Nova York: APS.
- VILCHES, A.; MACIAS, O.; GIL-PÉREZ, D. (2009). *Década de la Educación para la Sostenibilidad*. Madrid: Centro de Altos Estudios Universitarios de la Organización de Estados Iberoamericanos.
- Welcome to the anthropocene* [en línia] (2012). S. ll.: s. n. <<http://vimeo.com/anthropocene/shortfilm>> [Consulta: octubre 2013]. [Aquest vídeo forma part del material preparat per al primer portal educatiu sobre l'antropocè, <http://www.anthropocene.info/en/home>, promogut per la conferència «Un planeta sota pressió», celebrada a Londres el març de 2012]



Fernando Sapiña Navarro

És professor del Departament de Química Inorgànica i investigador de l'Institut de Ciència dels Materials de la Universitat de València. A banda de la investigació i la docència, la seua vessant més destacable és la tasca que està fent per apropar la ciència a la societat mitjançant la divulgació científica en temes relacionats amb el medi ambient, els materials o la cuina.

A/e: fernando.sapina@uv.es