



El fòsfor: constructor d'ecosistemes

Marcos Fernández-Martínez ^{1,2} , Jordi Sardans ^{3,4} , Josep Peñuelas ^{3,4} 

¹ Centre d'Excel·lència PLECO (Plantes i Ecosistemes), Departament de Biologia, Universitat d'Anvers, Wilrijk, Bèlgica.

² Delegació de la Serralada Litoral Central – ICHN, Mataró, Catalunya.

³ CSIC, Unitat d'Ecologia Global, CREA-FCI-UAB, Cerdanyola del Vallès, Catalunya.

⁴ CREA-FCI, Cerdanyola del Vallès, Catalunya.

Resum: El fòsfor és un element clau per a la biosfera. Joga un paper essencial tant en la construcció dels ecosistemes com en el seu funcionament i, per tant, també condiciona fortament les societats humanes que en depenen. En aquest treball repassem breument la història del descobriment del fòsfor i la seva importància a la societat i aprofundim en el paper que juga en els ecosistemes terrestres, un aspecte sovint poc explorat en comparació als sistemes aquàtics.

Summary: PHOSPHORUS: CONSTRUCTOR OF ECOSYSTEMS – Phosphorus is a key element in the biosphere. It plays a paramount role in shaping the structure and function of ecosystems and therefore strongly conditions the human societies that depend on them. In this paper, we briefly discuss the history of the discovery of phosphorus, its importance for society, and its paramount role in terrestrial ecosystems, which have received less attention than aquatic systems.

El fòsfor, l'element químic

El fòsfor (P) és un element indispensable per a la vida i per a la nostra societat. Amb un nombre atòmic 15 i un pes molecular de 30.97, a la taula periòdica el trobem situat molt a prop del carboni (C), del nitrogen (N) i de l'oxigen (O), també pilars de la química orgànica i, per tant, base de la vida. Però abans d'entrar en el paper que juga el fòsfor en els sistemes biològics, farem un petit resum, a tall anecdòtic, del que ha estat la seva història recent.

Descobriments

El fòsfor va ser descobert el 1669 a la ciutat d'Hamburg (actual Alemanya) per l'alquimista Hennig Brand. El seu descobriment resta envoltat d'un cert misteri, ja que els alquimistes rarament explicaven els seus mètodes en la recerca de la pedra filosofal. Sembla, doncs, que com tants altres avenços científics el fòsfor també va ser descobert per casualitat. La història explica que en Hennig Brand, intrigat pel color de l'orina, que com sabeu tendeix a groguenc quan s'està poc hidratat, va pensar que possiblement allà hi

podria trobar vestigis d'or. Entre els alquimistes de l'època experimentar amb fluids corporals era una pràctica força habitual. Va deixar assecar un grapat de cubells plens d'orina, que van originar una massa de color negre. Seguidament, sembla que va barrejar aquell material amb sorra i el va sotmetre a un tractament de calor. El que sembla clar és que al final del procés va aconseguir un material ric en fòsfor i que era *fosforescent* en la foscor (fig. 1). És per això que en un primer moment van anomenar aquest nou element com a *foc fred*. També se'l va conèixer amb l'apel·latiu d'*element del dimoni*, per haver estat l'element número 13 en ser descobert i pel fet de tendir a la combustió en presència d'oxigen (fòsfor blanc). Finalment es va optar per anomenar-lo fòsfor, del grec *phosphoros*, el portador de la llum. Des del seu descobriment, les aplicacions que s'han trobat al fòsfor han estat molt diverses.

Aplicacions i problemàtica social

Els llumins, antigament anomenats fòsfors pel seu cap format per fòsfor vermell (molt més estable que el blanc), són potser una de les primeres aplicacions que venen al cap quan es pensa



Figura 1. Pintura il·lustrant el descobriment del fòsfor per l'alquimista Hennig Brand al 1669. Títol original: *The alchymist, in search of the philosopher's stone, discovers phosphorus, and prays for the successful conclusion of his operation, as was the custom of the ancient chymical Astrologers*, per Joseph Wright de Derby (1771).

en els usos del fòsfor, però definitivament no és la més important. El fòsfor està involucrat en multitud de processos que es duen a terme en la indústria química moderna. El podem trobar a la indústria de l'alimentació, per fer detergents i, el més important de tots, al món de l'agricultura. Junt amb el nitrogen i el potassi (K), el fòsfor és un macronutriente necessari pel bon rendiment dels cultius i, avui dia, indispensable per alimentar la creixent població mundial. D'aquesta manera, els fertilitzants van esdevenir pal de paller de la revolució verda que vam experimentar durant el segle passat i que va permetre assolir els nivells més alts de producció alimentària en l'àmbit global. Sense aquests, bona part dels que avui habitem a l'anomenat primer món, literalment, no hi seríem.

És per això que el subministrament de fòsfor a escala global és d'importància cabdal pel sosteniment de la societat moderna. Prova d'aquest fet va tenir lloc durant els anys 2007-2008, quan un increment desmesurat i sobtat dels preus del ni-

trogen i el fòsfor fets servir en la indústria dels fertilitzants van causar una crisi global del preu dels aliments. I és que no són gaires els països que disposen de reserves de fòsfor. Aquests són majoritàriament els Estats Units, Sud-àfrica, la Xina i, sobretot, el Sàhara Oriental, on s'estima que s'hi troben, aproximadament, el 37% de les reserves mundials de fòsfor. Els conflictes geopolítics al voltant del fòsfor, doncs, estan assegurats, especialment tenint en compte la demanda creixent que es necessitarà per a abastir una població mundial en augment.

El fòsfor a la biosfera

Com hem esmentat anteriorment, el fòsfor el trobem estretament lligat al carboni i al nitrogen a la biosfera. Dintre de la cèl·lula, el trobem formant part de l'ADN, l'ARN, i els ribosomes, i essent part essencial de l'adenina trifosfat (ATP), vector energètic indispensable per desenvolupar el metabo-

lisme de la cèl·lula. Sempre fa de mal dir quin és l'element més important per a la vida, ja que tots són igualment imprescindibles. Tot i així, el fòsfor té unes característiques que fan que organismes i ecosistemes amb diferents disponibilitats de fòsfor funcionin de formes molt diferents. El motiu principal és que el fòsfor és sovint un element que es troba en quantitats que limiten el funcionament dels organismes. El carboni és fàcilment assimilable a través de la fotosíntesi dels productors primaris. El nitrogen pot entrar als sistemes biològics mitjançant la deposició atmosfèrica, la fixació a través de bacteris i fongs simbiòtics situats a les arrels i fins i tot procedent de la litologia (Houlton *et al.*, 2018). En canvi, el fòsfor, només té dues maneres d'entrar, de forma natural, a la cadena tròfica a través dels productors primaris: per meteorització de la litologia que els sustenta i per deposició atmosfèrica. Per descomptat, ambdós processos depenen fortament de la litologia i de l'enclavament de l'ecosistema. Per exemple, les roques volcàniques acostumen a estar enriquides amb minerals rics en fòsfor, mentre que la litologia sedimentària acostuma a ser molt pobre en aquests minerals. D'altra banda, la deposició atmosfèrica de fòsfor dependrà de la situació de l'ecosistema en relació als corrents d'aire i les zones d'emissió (el Sàhara en el nostre cas).

Un cop el fòsfor ha entrat a l'ecosistema, però, es pot reciclar mitjançant la descomposició de la

matèria orgànica, l'anomenada mineralització, un procés al qual altres elements també n'estan subjectes, com ara el nitrogen, el potassi, el magnesi, etc. Per descomptat, el clima hi jugarà un paper cabdal regulant aquestes taxes de mineralització, ja que en climes càlids i humits (com ara els tropicals) la descomposició de la matèria orgànica i, per tant, la mineralització és molt ràpida. Cas contrari el trobem en llocs freds i secs, on els organismes descomponedors de la matèria orgànica (sapròtrofs: macroinvertebrats, fongs, bacteris...) veuen limitat el seu funcionament pel fred i la manca d'aigua.

Un altre impediment per a l'assimilació del fòsfor per part dels productors primaris és que les formes assimilables de fòsfor (és a dir, el fosfat: PO_4^{3-}) només estan àmpliament disponibles al sòl en un rang relativament curt de pH, dels 6 als 6.75 aproximadament, en comparació amb el nitrogen, fàcilment disponible des de pH 6 fins a 8 (Truog, 1946). Aquest és un altre dels motius pels quals el fòsfor és tan sovint un element limitant en els ecosistemes. Tanmateix, quan a causa de l'activitat humana les concentracions de fòsfor es disparen, les conseqüències poden ser catastròfiques des del punt de vista del funcionament dels sistemes. Un clar exemple és el de l'eutrofització de les aigües continentals a causa de l'ús i abús de fertilitzants i/o detergents. Aquestes condicions d'elevades concentracions de nutrients propicien



Figura 2. Una capa d'algues (bloom algal) en un llac eutrofitzat a Schleswig-Holstein, Alemanya, el 23 d'agost del 2009. Autor: Smaack, sota llicència: CC-BY-SA-4.0.

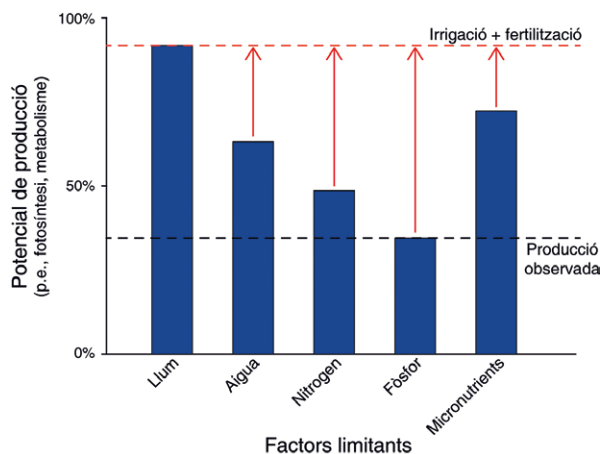


Figura 3. Esquema de la llei de mínims de Liebig. La producció d'un organisme o d'un sistema biològic assolirà, com a màxim, el topall que li confereixi el factor que li sigui més limitant per a la seva producció, en aquest exemple, el fòsfor. En aquest hipotètic exemple, afegir irrigació i fertilització amb nitrogen, fòsfor i micronutrients, podria fer augmentar la productivitat fins al límit que li permet la radiació solar.

blooms algals que canvien radicalment l'estructura i el funcionament dels ecosistemes (fig. 2). Com pot afectar els ecosistemes terrestres, ho veurem a continuació.

Effecte sobre el funcionament dels ecosistemes terrestres

Com a regla general, la biosfera tendeix a treballar sota la llei de mínims de Liebig (fig. 3). Breument, aquesta llei consisteix en què els sistemes biològics tendeixen a funcionar al màxim rendiment d'una determinada variable (p. ex., fotosíntesi) que els permeti el factor més limitant que controli esmentada variable (p. ex., el fòsfor, l'aigua, la llum). Això implica que si a una planta li manca llum per augmentar la seva fotosíntesi, regar-la més no farà que fotosintetizzi més: el que necessita és més llum. Talment passa amb els nutrients i, com hem vist, el fòsfor n'és sovint el factor limitant. Petites diferències en la quantitat i la relació entre el carboni, el nitrogen i el fòsfor disponibles per als organismes (és a dir, diferències en l'estequiometria dels elements) faran que aquests es comportin o que funcionin d'una determinada manera o d'una altra (Elser *et al.*, 2000). Per exemple, s'ha vist que allà on el fòsfor és baix en comparació amb el nitrogen disponible al sòl, els microorganismes tendeixen a produir fosfates per augmentar-ne la disponibilitat (Margalef *et al.*, 2017). Alhora, s'ha vist que organismes amb diferent disponibilitat de C:N:P tendeixen a comportar-se o a competir seguint estratègies diametralment diferents (Elser *et al.*, 2003, 2010; Peñuelas *et al.*, 2019). Organismes amb una relació N:P elevada (limitats pel P) tendeixen a ser de creixement més lent, però sovint millors competidors (estratègies de la K). El contrari es tro-

ba en organismes amb elevades concentracions de nutrients i una relació N:P baixa. Aquests són capaços de créixer més ràpidament, però no són tan bons competidors (estratègies de la *r*). Estudis recents apunten al fet que les plantes més riques en nutrients (N i sobretot P), tendeixen a produir més llavors i d'una manera més constant (Fernández-Martínez *et al.*, 2016b, 2019 en revisió). Res de nou si tenim present que els nostres pagesos han estat fent servir adobs durant segles per tal d'augmentar la producció d'aliments.

D'altra banda, els estudis també assenyalen que els boscos més fèrtils (amb més nutrients) són capaços de produir més biomassa i de segrestar més CO₂ per unitat de fotosíntesi i, a més, de mantenir el carboni fotosintetitzat al bosc durant més temps (Vicca *et al.*, 2012; Fernández-Martínez *et al.*, 2014, 2016a). Els resultats semblen indicar que aquests canvis en el funcionament dels boscos tenen a veure amb la diferent capacitat de les comunitats per processar el carboni absorbit. D'una banda, quan manquen els nutrients, organismes autòtrofs poden destinar part del carboni fotosintetitzat a establir relacions simbiòtiques amb fongs (és a dir, micorizes) i d'altres microorganismes que els subministraran els nutrients que per sí sols no poden aconseguir. Això, és clar, té un cost per a la planta, ja que aquest carboni destinat a alimentar els microorganismes serà respirat en forma de CO₂ i retornat a l'atmosfera, reduint la seva capacitat de creixement i d'emmagatzemar carboni en estructures de llarga vida com ara troncs. També s'ha vist que les plantes més riques en nutrients tendeixen a emetre menys compostos orgànics volàtils (COVs). Aquests compostos sovint es fan servir com a mesura de defensa de la planta, ja sigui per evitar la depredació per herbívors o per augmentar la fotoprotecció i evitar l'estrès fotooxidatiu. En aquest cas, el que s'ha observat és que aquelles plantes que són capaces de mantenir nivells més elevats de fòsfor en fulla tendeixen a emetre menys quantitat d'isoprens i monoterpens (Fernández-Martínez *et al.*, 2018). Aquest fet, potencialment, allibera a les plantes riques en fòsfor de perdre carboni en forma de COVs i poder-lo fer servir per créixer més i ser més competitives. Tanmateix, es pot interpretar com que en créixer més, no poden assignar tant carboni en forma de COVs.

El fet que petites diferències en les concentracions de nutrients puguin comportar importants diferències en el funcionament dels ecosistemes també implica que alteracions en les entrades i sortides d'aquests elements també comportin canvis en llur funcionament. Aquest darrer aspecte és d'especial importància si tenim en compte que vivim en un context de canvi global, caracteritzat per a l'augment del CO₂ atmosfèric i la deposició de nitrogen a escala global, ambdós fruit de la crema de combustibles fòssils. Aquest fet que fa que el carboni i el nitrogen siguin cada cop més abundants respecte al fòsfor que, com hem

vist abans, tan sols pot entrar als sistemes per via de la meteorització de la roca i la deposició atmosfèrica d'origen majoritàriament natural. De fet, aquests canvis en la disponibilitat global relativa de carboni, nitrogen i fòsfor ja han comportat canvis en el funcionament dels ecosistemes a escala global (Sardans *et al.*, 2012) i es preveu que aviat comencin a condicionar, negativament, la capacitat de la biosfera de segrestar CO₂ i, per tant, mitigar el canvi climàtic (Peñuelas *et al.*, 2012, 2013, 2017). Tanmateix, fins ara, el que s'ha observat és que l'augment de les concentracions de CO₂ atmosfèric han comportat un increment global en les taxes de segrest de carboni per part dels boscos (Fernández-Martínez *et al.*, 2017) i de la resta d'ecosistemes terrestres a gran escala (Fernández-Martínez *et al.*, 2019). Altres estudis també han fet notar un increment en l'eficiència en l'ús de l'aigua (Peñuelas *et al.*, 2011; Keenan *et al.*, 2013). Aquests canvis es donen gràcies al que es coneix com l'efecte fertilitzador del CO₂: com que les concentracions de CO₂ són cada cop més elevades, a les plantes no els cal obrir tant els estomes de manera que perden menys aigua. El que pugui passar a partir d'ara, atès el creixent desequilibri entre el C:N:P, és encara incert, tot i que, com s'ha comentat unes línies més amunt, el coneixement científic actual no dona peu a gaire optimisme pel que fa a la resposta dels sistemes biològics. El que ens té preparat l'esdevenir serà estudiat amb molt d'interès per part de la comunitat científica.

Agraïments

La recerca presentada en aquest treball s'ha dut a terme gràcies al projecte CGL2016-79835-P (FERTWARM) del Govern Espanyol, al projecte Synergy del Consell de Recerca Europeu ERC-2013-726 SyG-610028 IMBALANCE-P, i al projecte SGR 2017-1005 de la Generalitat de Catalunya. M.F.-M. és un investigador postdoctoral de la Fundació de Recerca de Flandes (FWO).

Referències

- Elser, J.J., Acharya, K., Kyle, M., Cotner, J., Makino, W., Markow, T., Watts, T., Hobbie, S., Fagan, W., Schade, J., Hood, J. i Sterner, R.W. 2003. Growth rate-stoichiometry couplings in diverse biota. *Ecology Letters*, 6(10): 936-943.
<https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2003.00518.x>
- Elser, J.J., Fagan, W.F., Denno, R.F., Dobberfuhl, D.R., Folarin, A., Huberty, A., Interlandi, S., Kilham, S.S., McCauley, E., Schulz, K.L., Siemann, E.H. i Sterner, R.W. 2000. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. *Nature*, 408(6812): 578-580.
<https://doi.org/10.1038/35046058>
- Elser, J.J., Fagan, W.F., Kerkhoff, a. J., Swenson, N.G. i Enquist, B.J. 2010. Biological stoichiometry of plant production: Metabolism, scaling and ecological response to global change. *New Phytologist*, 186(3): 593-608.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03214.x>
- Fernández-Martínez, M., Llusià, J., Filella, I., Niinemets, Ü., Arneth, A., Wright, I.J., Loreto, F. i Peñuelas, J. 2018. Nutrient-rich plants emit a less intense blend of volatile isoprenoids. *New Phytologist*, 220(3): 773-784.
<https://doi.org/10.1111/nph.14889>
- Fernández-Martínez, M., Sardans, J., Chevallier, F., Ciais, P., Obersteiner, M., Vicca, S., Canadell, J.G., Bastos, A., Friedlingstein, P., Sitch, S., Piao, S.L., Janssens, I.A. i Peñuelas, J. 2019. Global trends in carbon sinks and their relationships with CO₂ and temperature. *Nature Climate Change*, 9: 73-79.
<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0367-7>
- Fernández-Martínez, M., Vicca, S., Janssens, I.A., Campioli, M. i Peñuelas, J. 2016a. Nutrient availability and climate as the main determinants of the ratio of biomass to NPP in woody and non-woody forest compartments. *Trees, Structure and Function*, 30: 775-783.
- Fernández-Martínez, M., Vicca, S., Janssens, I.A., Ciais, P., Obersteiner, M., Bartrons, M., Sardans, J., Verger, A., Canadell, J.G., Chevallier, F., Wang, X., Bernhofer, C., Curtis, P.S., Gianelle, D., Grünwald, T., Heinesch, B., Ibrom, A., Knohl, A., Laurila, T., Law, B.E., Limousin, J.M., Longdoz, B., Loustau, D., Mammarella, I., Matteucci, G., Monson, R.K., Montagnani, L., Moors, E.J., Munger, J.W., Papale, D., Piao, S.L., Peñuelas, J. 2017. Atmospheric deposition, CO₂, and change in the land carbon sink. *Scientific Reports*, 7: 9632 (July): 1-13.
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-08755-8>
- Fernández-Martínez, M., Vicca, S., Janssens, I.A., Espelta, J.M. i Peñuelas, J. 2016b. The role of nutrients, productivity and climate in determining tree fruit production in European forests. *New Phytologist*, 213: 669-679.
<https://doi.org/10.1111/NPH.14193>
- Fernández-Martínez, M., Vicca, S., Janssens, I.A., Sardans, J., Luyssaert, S., Campioli, M., Chapin III, F.S., Ciais, P., Malhi, Y., Obersteiner, M., Papale, D., Piao, S.L., Reichstein, M., Rodà, F. i Peñuelas, J. 2014. Nutrient availability as the key regulator of global forest carbon balance. *Nature Climate Change*, 4(6): 471-476.
<https://doi.org/doi:10.1038/nclimate2177>
- Houlton, B.Z., Morford, S.L., Dahlgren, R.A., 2018. Convergent evidence for widespread rock nitrogen sources in Earth's surface environment. *Science*, 360: 58-62.
<https://doi.org/10.1126/science.aan4399>
- Keenan, T.F., Hollinger, D.Y., Bohrer, G., Dragoni, D., Munger, J.W., Schmid, H.P. i Richardson, A.D. 2013. Increase in forest water-use efficiency as atmospheric carbon dioxide concentrations rise. *Nature*, 499(7458): 324-327.
<https://doi.org/10.1038/nature12291>
- Margalef, O., Sardans, J., Fernández-Martínez, M., Molowny-Horas, R., Janssens, I.A., Ciais, P., Goll, D., Richter, A., Obersteiner, M., Asensio, D. i Peñuelas, J. 2017. Global patterns of phosphatase activity in natural soils. *Scientific Reports*, 7(1): 1337.
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-01418-8>
- Peñuelas, J., Canadell, J.G. i Ogaya, R. 2011. Increased water-use efficiency during the 20th century did not translate into enhanced tree growth. *Global Ecology and Biogeography*, 20(4): 597-608.
<https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00608.x>
- Peñuelas, J., Ciais, P., Canadell, J.G., Janssens, I.A., Fernández-Martínez, M., Carnicer, J., Obersteiner, M., Piao, S., Vautard, R. i Sardans, J. 2017. Shifting from a fertilization-dominated to a warming dominated period. *Nature Ecology and Evolution*, 1: 1438-1445.
<https://doi.org/10.1038/s41559-017-0274-8>
- Peñuelas, J., Fernández-Martínez, M., Ciais, P., Jou, D., Piao, S., Obersteiner, M., Vicca, S., Janssens, I.A. i Sardans, J. 2019. The bioelements, the elementome and the "biogeochemical niche". *Ecology*, 1-20.
- Peñuelas, J., Poulter, B., Sardans, J., Ciais, P., van der Velde, M., Bopp, L., Boucher, O., Godderis, Y., Hinsin-

- ger, P., Llusia, J., Nardin, E., Vicca, S., Obersteiner, M. i Janssens, I.A. 2013. Human-induced nitrogen-phosphorus imbalances alter natural and managed ecosystems across the globe. *Nature Communications*, 4: 2934.
<https://doi.org/10.1038/ncomms3934>
- Peñuelas, J., Sardans, J., Rivas-ubach, A. i Janssens, I. a. 2012. The human-induced imbalance between C, N and P in Earth's life system. *Global Change Biology*, 18(1): 3-6.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02568.x>
- Sardans, J., Rivas-Ubach, A. i Peñuelas, J. 2012. The C:N:P stoichiometry of organisms and ecosystems in a changing world: A review and perspectives. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 14(1): 33-47.
<https://doi.org/10.1016/j.ppees.2011.08.002>
- Truog, E. 1946. Soil Reaction Influence on Availability of Plant Nutrients1. *Soil Science Society of America Journal*, 11(C): 305.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1947.036159950011000C0057x>
- Vicca, S., Luyssaert, S., Peñuelas, J., Campioli, M., Chapin, F.S., Ciais, P., Heinemeyer, A., Högberg, P., Kutsch, W.L., Law, B.E., Malhi, Y., Papale, D., Piao, S.L., Reichstein, M., Schulze, E.D. i Janssens, I. a. 2012. Fertile forests produce biomass more efficiently. *Ecology Letters*, 15(6): 520-6.
<https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2012.01775.x>