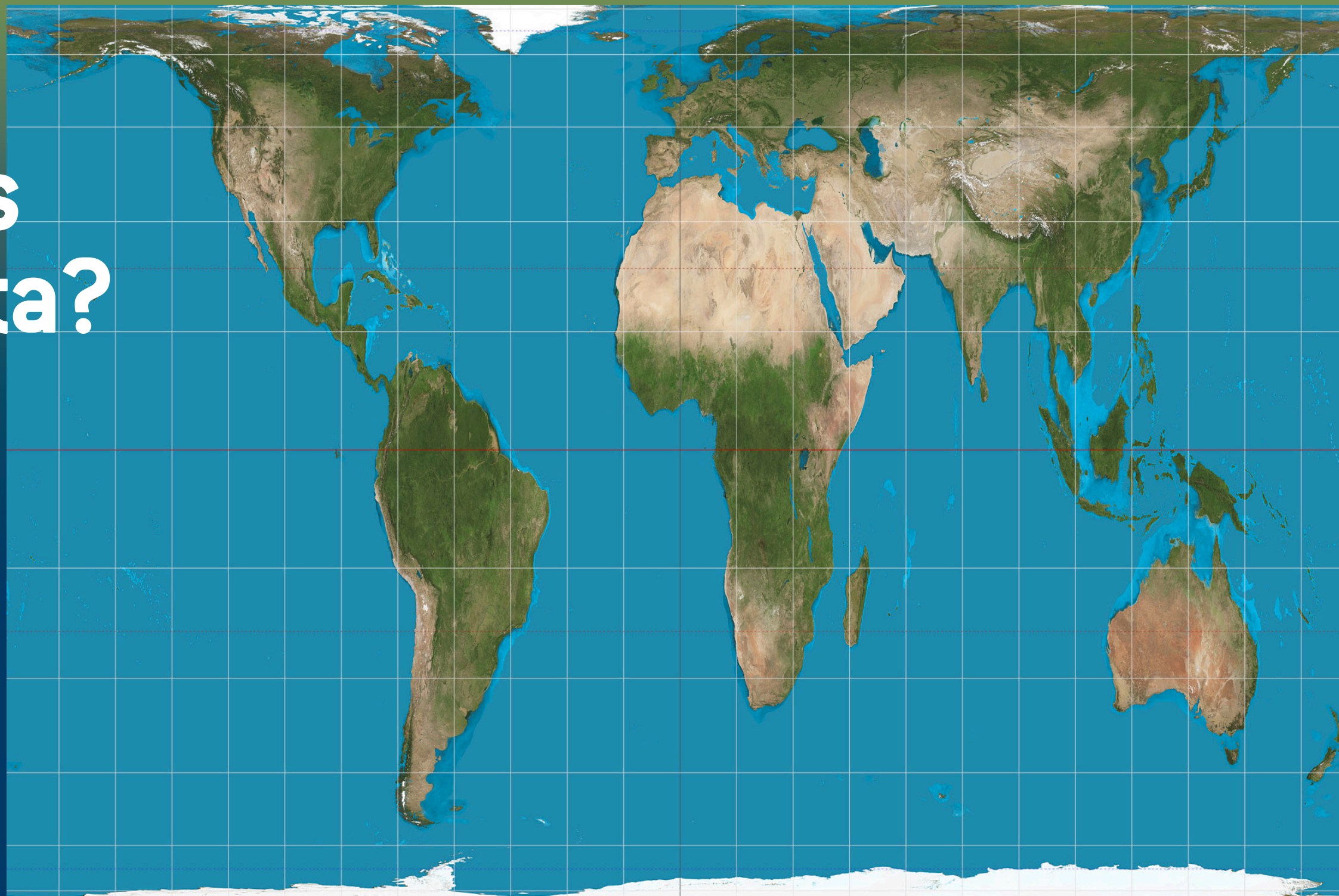


¿Ú tán les coraes del planeta?



Por **José Ramón Obeso**

Caderalgu d'Ecoloxía

Departamentu de Bioloxía d'Organismos y Sistemes

Institutu Mestu d'Investigación en Biodiversidá (IMIB), Universidá d'Uviéu

Conseyu Superior d'Investigaciones Científiques y Principáu d'Asturies

Distribución del agua nel planeta Tierra (mapa de Daniel R. Strebe, 15 de xunetu del 2011).

LA IMPORTANCIA DEL OXÍXENU

Les viesques tropicales, y cualesquier viesca en xeneral, suelen considerase los «pulmones del planeta» por mor de la so capacidá p'absorber dióxidu de carbonu y producir oxíxenu. Sicasí, esta interpretación que ta tan arraigonada socialmente ye en realidá un falsu mitu que poco tien que ver col conocimientu científicu del que disponemos anguaño.

La cantidá d'oxíxenu disponible na nuesa atmósfera ye'l resultáu d'una historia mui llarga nel planeta. L'oxíxenu ye l'elementu más abondosu de la corteza terrestre, yá que representa casi la metá (46 %) d'ella. Amás, si consideramos tola masa del planeta, sedría'l segundu elementu que más pesu tien (30 % del total), namás per detrás del fierro (32 % del total).

Sicasí, na so forma llibre, oxíxenu molecular O₂, na atmósfera primitiva del nuesu planeta taba mui poco disponible. Nos primeros 2.000 millones d'años (Ma) de la historia del planeta, la so concentración na atmósfera representaba namás el 0,001 %. Esto desplicase porque l'oxíxenu ye una especie química mui reactiva y tiende a oxidar a otros munchos elementos. Asina, tenemos cantidaes inmensas d'agua (óxidu d'hidróxenu), arena (dióxidu de siliciu) y óxidos de fierro, ente dellos otros. Sicasí, anguaño, l'oxíxenu representa'l 21 % de la composición atmosférica. Entós, ¿qué procesu camudó esta situación y llevó oxíxenu na so forma llibre, O₂, dende'l 0,001 % al 21 % de la composición atmosférica d'anguaño?

La historia de la medra de la concentración d'oxíxenu na atmósfera tien recibío muncha atención interdisciplinar de recién, pero ello nun quita pa que'l ruempcabeces entá nun se resolviere dafechu. De recién, la información bioxeoquímica atribúi a les primeres plantes

Les viesques tropicales, y cualesquier viesca en xeneral, suelen considerase los «pulmones del planeta» pola so capacidá p'absorber dióxidu de carbonu y producir oxíxenu. Sicasí, esta interpretación ye en realidá un falsu mitu que poco tien que ver col conocimientu científicu del que disponemos anguaño. De recién, la información bioxeoquímica atribúi a les primeres plantes terrestres dende va 470 millones d'años (Ma) el gran procesu d'oxidación atmosférica hasta llegar a los niveles actuales

terrestres dende va 470 Ma el gran procesu d'oxidación atmosférica hasta llegar a los niveles actuales (Lenton *et al.*, 2016).

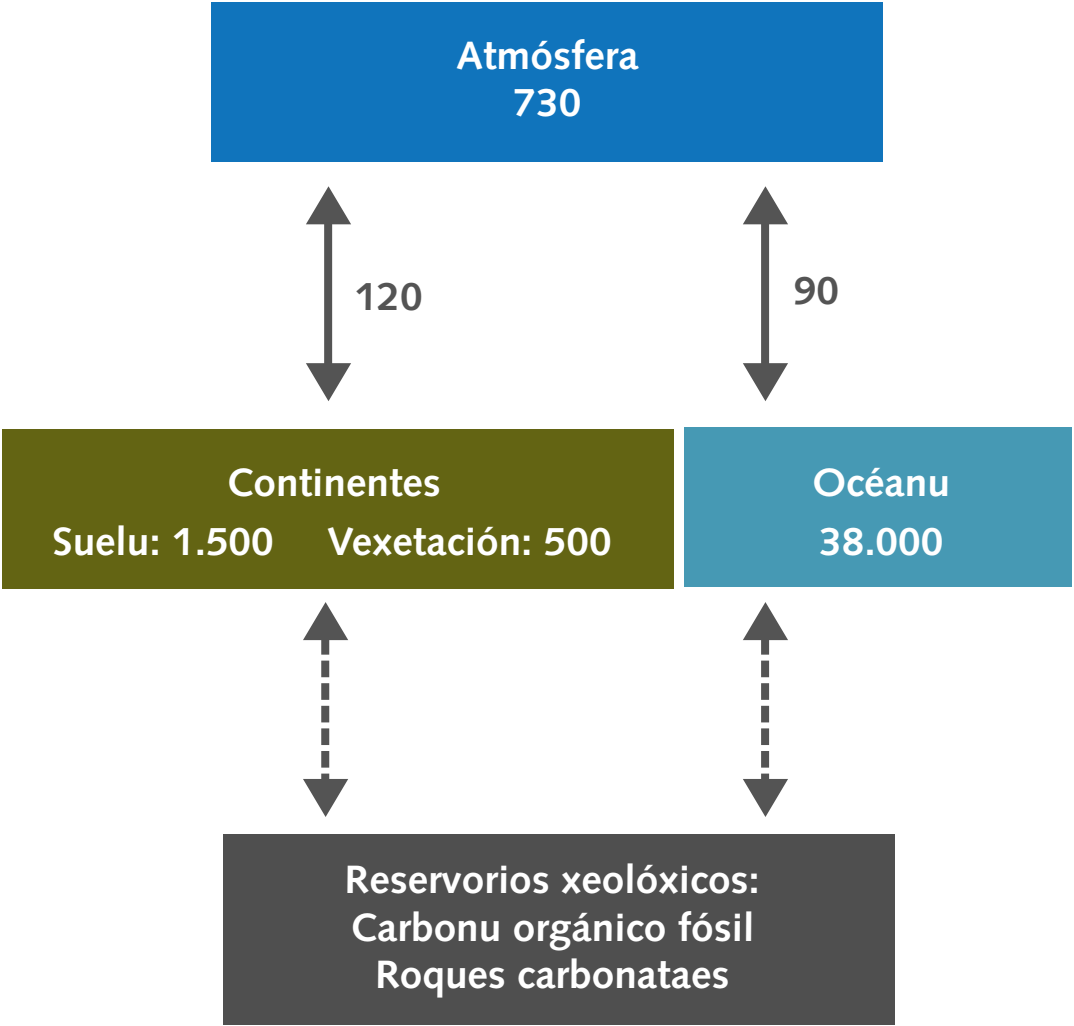
EL CICLU DEL OXÍXENU TA VENCEYÁU AL CICLU DEL CARBONU

El ciclu global del oxíxenu ta venceyáu al del carbonu, como amuesa la ecuación básica de producción-consumu de biomasa (1), lo qu'indica una correlación negativa ente dióxidu de carbonu y oxíxenu. La producción de biomasa más importante del planeta a nivel cuantitativu (<98 %) surge de la fotosíntesis oxixénica (1) que ye la que faen plantes, algues y munches bacteries. L'oxíxenu produciu por esti procesu utilízase de manera cíclica pa oxidar la biomasa produciu, asina como la necromasa (carbonu del suelu y materia orgánica muerta), al traviés de procesos de respiración y/o descomposición.



El ciclu natural del carbonu (Figura 1) ta equilibráu práuticamente. Depués de les roques carbonataes y el carbonu fósil que procede de materia orgánico, l'océanu ye la mayor reserva de carbonu, lo más d'ello na so forma inorgánica, dentro del equilibriu carbónicu-carbonatu.

Nos continentes, la mayor parte del carbonu orgánicu alcuéntrase nel suelu. Cada añu la vexetación de los continentes incorpora dende

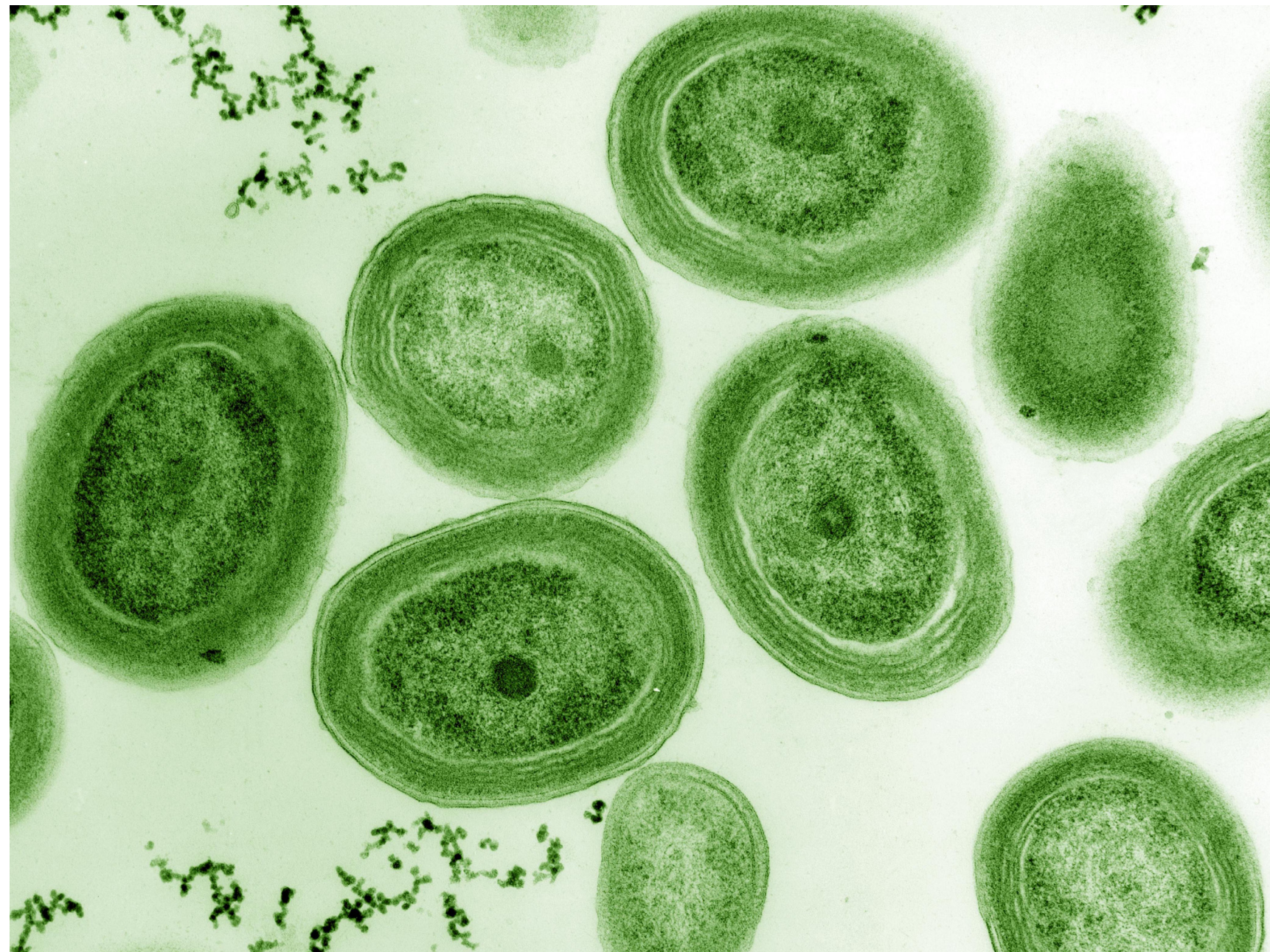


ARRIBA
Figura 1. El ciclu natural global del carbonu simplificáu: tomáu de Prentice *et al.* (2001). Les cantidaes de los reservorios (caxes) amuénsense en petagramos (Pg = 10¹⁵ g) y de los fluxos añales de carbonu (fleches) en Pg añu⁻¹. Nun s'inclúin les alteriaciones atrópiques del ciclu.

l'atmósfera a la biomasa de los ecosistemas 120 petagramos (Pg) de carbonu, pero una cantidá asemeyada devuélvese a l'atmósfera por procesos d'oxidación de la materia orgánico: 60 Pg (55 %) correspuenden a la respiración de la propia vexetación (respiración autótrofa), 55 Pg (45 %) a la respiración heterótrofa (respiración d'organismos que consumen materia orgánico, yá seya vivo o muerto: animales, fungos, microorganismos) y 4 Pg por procesos de combustión natural. De manera asemeyada, nos océanos, los productores primarios (cianobacteries fotosintétiques y algues) amiesten 103 Pg C añu⁻¹ a la materia orgánico, pero la producción neta ye de 45 Pg C añu⁻¹, yá que la respiración autótrofa consume 58 Pg C añu⁻¹ (56 %) y la heterótrofa 34 Pg C añu⁻¹ (34 %).

Considerando la proporción d'oxíxenu que contién el dióxidu de carbonu, los organismos que faen fotosíntesis oxixénica nel planeta producen, añalmente, unos 600 Pg d'O₂. Sicasí, los procesos d'oxidación de la materia orgánico (respiración, descomposición, combustión natural) consumen aproximadamente la mesma cantidá.

Al suponer l'oxíxenu que contién l'atmósfera, más o menos, $1,2 \times 10^{21}$ g, tolos organismos fotosintéticos del planeta tardaríen más de 2.000 años en producir esa cantidá d'oxíxenu. Polo tanto, tenemos un ciclu más o menos axustáu (nun ye exautamente equilibráu porque los ecosistemas puen almacenar C o perdelo por combustiones naturales): aproximadamente la mesma cantidá de carbonu qu'ingresa nos ecosistemas terrestres dende l'atmósfera pola fotosíntesis de los organismos autótrofos únviase otra vez a l'atmósfera pola respiración de los organismos del ecosistema que producen dióxidu de carbonu como residuu. Asina, la mesma cantidá d'oxíxenu que se produz como residuu del procesu fotosintéticu consúme-la la respiración de los organismos del ecosistema,



En conclusión, nin la vexetación terrestre actual nin los organismos fotosintéticos marinos son los responsables de la producción del oxíxenu que respiramos.

ARRIBA

Figura 2. La cianobacteria Prochlorococcus.

qu'oxiden la materia orgánico pa producir enerxía. En conclusión, nin la vexetación terrestre actual nin los organismos fotosintéticos marinos son los responsables de la producción del oxíxenu que respiramos.

¿Y Ú TA LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA NEL PLANETA?

Efectivamente, nos sistemas terrestres los viesques tropicales son responsables del 35 % de la producción de biomasa, magar qu'ocupen namás el 12 % de la superficie terrestre. Síguenlos de cerca les sabanes y praderes tropicales que, magar de ser vexetación yerbáceo baxo, suponen el 24 % de la producción global de los continentes (Mooney, Roy & Saugier, 2001).

Nos océanos, el fitoplacton ye responsable del 95 % de la producción primaria total. Los grupos más importantes son: diatomees n'agua rico en nutrientes, dinoflaxelaos, cocolitofóridos en zones con concentraciones medies de nutrientes y cianobacteries (*Prochlorococcus*, *Synechococcus*) n'agua probe en

nutrientes (oligótrofa).

En concreto, considérase a *Prochlorococcus* (Figura 2) responsable d'ente'l 20 y el 40 % de tola producción del océanu. Esti xéneru de cianobacteries¹ ye de tamañu pequeñu (0,6 micres),

1. Nota editorial: Más información sobre les Cianobacteries en *Ciencias* 8, pp. 4-19.

habita zones cálides y probes en nutrientes (agua tropical y subtropical), ye l'organismu fotosintéticu más abundante del planeta y l'organismu más importante en términos de producción de materia orgánico. Tienen una diversidá xenética y fisiolóxica considerable. Anque de manera individual, cada célula tien un xenoma relativamente simple, coleutivamente la población global contién un xenoma que-y permite tener éxitu nuna gran variedá de condiciones ambientales: intensidá de lluz, temperatura y nutrientes (Biller *et al.*, 2015). En resume, les rexones tropicales nos continentes y les cianobacteries nel océanu son los verdaderos responsables de la mayor parte de la producción de biomasa nel planeta.

LA LLARGA HISTORIA DEL OXÍXENU NA ATMÓSFERA

Si la producción d'oxíxenu polos ecosistemas ta más o menos equilibrada col so consumu, pa que s'acumule oxíxenu na atmósfera la tasa d'incorporación de C a los ecosistemas tien de superar la tasa de descomposición qu'unvia CO₂ a l'atmósfera, lo que conduz a l'acumulación de materia orgánico resistente a la biodegradación nos ecosistemas.

La historia de l'acumulación d'oxíxenu na atmósfera a gran escala entamó col desarrollu evolutivu, fai unos 2.500 Ma, d'un mecanismu nuevu de xeneración de materia orgánico por microorganismos que nun yeren quien a facer la fotosíntesis oxiénica: les cianobacteries primitives o antecesores de les actuales del grupu de les *Oxyphotobacteria*. El so anovamientu verdaderu consistió nel desarrollu d'un sistema de centros de reaición fotoquímicos (posiblemente alquiríos per tresferencia xenética horizontal dende otra bacteria fotosintética non oxiénica)

qu'empleguen la enerxía llumínica xenerao pol sol pa producir la fotólisis del agua y lliberar O₂ como residuu del procesu fotosintéticu. La so capacidá pa utilizar agua, un recursu particularmente abundante nel planeta, como donante d'electrones pa la fotosíntesis impulsó una producción primaria esplosiva frente a les restricciones impuestes pola disponibilidá d'otres fontes de donantes qu'otros fotoautótrofos taben emplegando, como H₂S, H₂, Fe²⁺. Estes bacteries con fotosíntesis non oxiénica tán circunscrites a ambientes anaerobios (sedimentos, pantanos, zones d'agua termal, llagos con sulfhídricu) y la so importancia cuantitativa anguaño ye poco relevante en comparanza cola fotosíntesis oxiénica (<2 %).

L'oxíxenu que procede d'esta actividá fotosintética atopóse darréu pol fierro reduciu (ion ferroso, Fe²⁺), que yera predominante nel océanu. El resultáu foi la producción de cantidaes inmensas d'óxidu de fierro que se depositaron nos sedimentos oceánicos formando les denominaes «formaciones de fierro bandiao» (*banded iron formations*), que se produxeron hasta va unos 2.000 Ma. Esto denominóse «eventu de gran oxidación» (*great oxydation event*).

La verdadera acumulación d'oxíxenu na atmósfera prodúxose va 470 Ma cola espansión de la vexetación terrestre nel planeta (Lenton *et al.*, 2016). Primero, cola espansión de plantes non vasculares (musgos y hepátiques), siguida pola espansión de plantes vasculares, en particular los primeros árboles dende va 385 Ma.

La espansión de la vexetación terrestre asocióse temporalmente con una reducción de la concentración de CO₂ na atmósfera y una acumulación d'O₂. Esti cambéu na composición atmosférica namás se pue producir si la tasa d'incorporación de C a la vexetación su-

La verdadera acumulación d'oxíxenu na atmósfera prodúxose va 470 Ma cola espansión de la vexetación terrestre nel planeta (Lenton et al., 2016). Primero, cola espansión de plantes non vasculares (musgos y hepátiques), siguida pola espansión de plantes vasculares, en particular los primeros árboles dende va 385 Ma

pera la tasa de descomposición qu'unvia CO₂ a l'atmósfera, lo que trai con ello l'acumulación de materia orgánico resistente a la biodegradación nos ecosistemas. Efeutivamente, esti periodu d'aumentu d'oxíxenu atmosféricu coincide col enterramientu de cantidaes inmensas de carbonu que dio llugar a los depósitos de carbón, sobre manera nel Devónicu y el Carboníferu (l'atmósfera algama'l 23-26 % d'oxíxenu al final d'esti periodu).

Dende entós, les oscilaciones de la pO₂ (presión parcial d'oxíxenu) tienen una historia xeolóxica llarga na que s'entemecen les influencies mutues, de retrocontrol, ente la pCO₂, el pO₂, la vexetación terrestre, la combustión natural y el clima, asina como les interacciones y retrocontrol de los ciclos bioxeoquímicos globales del carbonu, zufre, fósforu y oxíxenu (Berner, 1999; Alcott *et al.*, 2019). Si la pO₂ medra muncho, prodúcense quemes de vexetación a escala global que consumen oxíxenu menguando la so concentración na atmósfera. La medra del pO₂ trai con ella la baxada del CO₂ cola consecuente medra de temperatura. Dalgunes hipótesis asocien estos cambeos con dalgunos de les grandes estinciones que se produxeron a lo llargo de la historia de la vida. Asina sedría'l casu de la gran estinción del final del Paleozoico, que s'asocia con un enfriamientu (Montañez & Poulsen, 2013).

¿QUIÉN ASFIXA LES CORAES DEL PLANETA?

La cantidá d'oxíxenu de l'atmósfera ye tan alta con rrellación al oxíxenu que se moviliza nel so ciclu global, que difícilmente podemos camudalo de manera significativa. Les actividaes antrópiques alteriaron sensiblemente'l ciclu de carbonu afeutando a la concentración de CO₂ na atmósfera con incidencia notable sobre'l clima global. Sicasí, la concentración d'esti gas ye

L'acumulación d'oxíxenu na atmósfera entamó hai unos 2.500 millones d'años coles cianobacteries primitives o antecesores de les actuales Oxyphotobacteria, pero la verdadera acumulación prodúxose hai 470 Ma cola espansión terrestre de plantes non vasculares a lo primero y vasculares (sobremanera los árboles) depués.

de 420 partes por millón (ppm), mientras que la d'oxíxenu ye 210.000 ppm. Estímase que les actividaes antrópiques que consumen oxíxenu atmosféricu, como l'usu de combustibles fósiles, les quemes, la producción añal y les actividaes agrícolas mermen cada añu en 4 ppm la cantidá d'oxíxenu atmosféricu (Keeling & Manning, 2014; Huang *et al.*, 2021). A esti ritmu, tardaríamos delles decenes de miles d'años n'acabar les reserves d'oxíxenu atmosféricu.

En conclusión, los «pulmones del planeta» foron les primeres plantes terrestres, porque'l ciclu bioxeoquímicu global del oxíxenu actual ta más o menos balanciáu en cuanto a producción y consumu polos ecosistemas. Amás, la cantidá d'oxíxenu atmosféricu disponible pa la respiración de los ecosistemas ye tan alto que'l so consumu, por mor de les actividaes antrópiques, nun afeuta sensiblemente al ciclu global del oxíxenu, anque sí lo fai de manera significativa al ciclu de carbonu.

Referencies bibliográfiques

Alcott, L. J., Mills, B. J. W. & Poulton, S. W. (2019). Stepwise Earth oxygenation is an inherent property of global biogeochemical cycling. *Science* 366, pp. 1333–137.

Berner, R. A. (1999). Atmospheric oxygen over Phanerozoic time. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 96, pp. 10955–10957.

Biller, S. J., Berube, P. M., Lindell, D. & Chisholm, S. W. (2015). Prochlorococcus: the structure and function of collective diversity. *Nature Reviews Microbiology* 13, pp. 13–27.

Huang, J., Liu, X., He, Y., Shen, S., Hou, Z., Li, S., Li, C., Yao, L. & Huang, J. (2021). The oxygen cycle and a habitable Earth. *Science China. Earth Sciences*.

Keeling, R. F. & Manning, A. C. (2014). Studies of recent changes in atmospheric O₂ content. En Holland, H. D. & Turekian, K. K. (Eds.). *Treatise on Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, pp. 385–404. doi: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00420-4. [Segunda edición].

Montañez, I. P. & Poulsen, C. J. (2013). The Late Paleozoic Ice Age: An evolving paradigm. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 41, pp. 629–656.

Lenton, T. M., Dahl, T. W., Daines, S. J., Mills, B. J. W., Ozaki, K., Saltzman, M. R. & Porada, P. (2016). Earliest land plants created modern levels of atmospheric oxygen. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 113(35), pp. 9704–9709. doi: 10.1073/pnas.1604787113.

Mooney, H. A., Roy, J. & Saugier, B. (2001). *Terrestrial Global productivity*. Elsevier: Academic Press.

Prentice, I. C. *et al.* (2001) The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. En Houghton, J. T. *et al.* (Eds.). *Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, pp. 185-225. Cambridge: Cambridge University Press.