

L'aplicació dels fòssils a la crisi ecològica actual: som a la sisena extinció massiva de la Terra?

Marc Furió Bruno^{1,2}

Resum:

Molts científics alerten del moment que pateix la biosfera actualment i el comparen amb altres moments crítics de la història de la Terra. Què en sabem d'altres episodis d'extinció massiva en el passat? És de tots conegut que l'extinció i l'evolució dels organismes són processos naturals i fins a cert punt inevitables. Així doncs, com és de greu la situació actual? La paleontologia proporciona una visió temporal que permet calibrar la magnitud de l'episodi actual de pèrdua de biodiversitat.

Paraules clau:

Biodiversitat, paleontologia, futur, col·lapse, ecosistemes.

Introducció

La paleontologia és la branca de la ciència que estudia la vida en el passat mitjançant els fòssils. Essent així, es pot dir que aquesta és una disciplina científica híbrida que combina coneixements de la geologia i la biologia, però que al mateix temps nodreix ambdues vessants de la ciència amb noves dades i perspectives. La paleontologia, mitjançant la biologia, reporta a la geologia una visió dinàmica de les entitats fossilitzades, en tant que aquestes són les restes corporals d'organismes que van viure en el passat, o bé les evidències petrificades de la seva activitat vital. En sentit contrari, es pot argumentar que la paleontologia, mitjançant la geologia, proporciona a la biologia una dimensió temporal de la vida i la seva evolució, difícilment calculable atenent només a les formes de vida actuals.

Més enllà dels espectaculars exemplars exposats als museus de ciències naturals de tot el món, l'adquisició i estudi dels fòssils en sentit ampli proporciona a investigadors/es una panoràmica temporal i espacial de com ha anat canviant la vida al nostre planeta. Per poder treballar de manera eficient, el cervell dels paleontòlegs ha de redimensionar el concepte del temps a xifres que acostumen a escapar a la quotidianitat de qualsevol persona. Per tant, els professionals que estudien fòssils deixen de pensar en hores, dies o anys, i passen a treballar mentalment amb el milió d'anys com a unitat bàsica de la variable «temps». Així, la paleontologia pot referir-se a esdeveniments d'un parell d'ordres de magnitud per sobre i per sota d'aquesta unitat bàsica, però difícilment determinarà l'edat de fets del passat llu-

-
1. Professor Serra Húnter, Universitat Autònoma de Barcelona, Departament de Geologia, Unitat de Paleontologia, 08193 Cerdanyola del Vallès, Barcelona.
 2. Institut Català de Paleontologia Miquel Crusafont. Edifici Z (ICTA-ICP), Campus de la UAB 08193 Cerdanyola del Vallès, Barcelona.

nyà amb una resolució de l'ordre de les desenes de milers d'anys.

La perspectiva que adquireix la mirada paleontològica professional és tan gran, que tot el decurs històric de les civilitzacions (d'uns 5.000 anys), i fins i tot la mateixa existència de la nostra espècie *Homo sapiens* (ja existent fa més de 300.000 anys, segons Hublin *et al.*, 2017) passen freqüentment a ser vistos com a ridícules anècdotes en la història geològica de la Terra (calculada en uns 4.500 milions d'anys). Sota aquest particular prisma, la vida humana és desesperadament curta i la humanitat, una simple curiositat apareguda a la biosfera a última hora. Tanmateix, la increïble diversitat de formes de vida que hom pot veure arreu del món queda reduïda a una minúscula mostra: el 99,99% de totes les espècies que han existit mai al planeta són extintes a hores d'ara i amb prou feines en veiem actualment el 0,01% restant. De fet, amb base al registre fòssil de tota la història geològica de la Terra, es podria dir que la vida al nostre planeta tendeix a ser unicel·lular i majoritàriament limitada al medi aquàtic marí. La sorprenent diversitat de formes de vida macroscòpiques que habiten en el nostre planeta actualment és un fenomen relativament recent que, segons el registre fòssil, es remunta només als últims 600 dels 3.800 milions d'anys que fa que hi ha vida a la Terra. Els animals, les plantes i els fongs, formes de vida pluricel·lulars complexes presents avui dia a gairebé tots els ecosistemes mundials, amb prou feines protagonitzen el 15% final de la història dels éssers vius. Aquest darrer tram temporal on hom deixa de fer servir microscopis necessàriament per poder estudiar els fòssils s'anomena *Fanerozoic*, nom derivat del grec que fa referència literalment a aquest moment en què 'la vida es fa visible' (*phanerós* - visible, i *zôon* - ésser viu).

L'inici de l'eó Fanerozoic s'estableix en 542 milions d'anys enrere i s'estén fins a l'actualitat. La característica principal durant tot aquest interval temporal és que existeixen restes esqueletiques (parts dures fossilitzades) d'organismes pluricel·lulars. Avui dia se sap que prèviament, uns quants milions d'anys abans, ja hi havia éssers vius pluricel·lulars, però en-

cara no comptaven amb esquelets durs de fàcil fossilització. Una altra característica notable és que en el transcurs del fanerozoic, la vida ha anat augmentant considerablement el seu grau d'organització i complexitat. Paral·lelament, i amb un cert grau d'oscil·lació, la vida ha anat fent-se més diversa i ha anat conquerint nous espais on desenvolupar-se. Nogensmenys, un tercer factor que caracteritza el fanerozoic és la caiguda sobtada d'aquesta biodiversitat a nivell global en moments relativament curts a escala geològica. Aquests moments, coneguts des de fa anys per la geologia, s'anomenen *extincions massives*, i malgrat que alguns especialistes discrepen en el nombre total d'aquests esdeveniments, la paleontologia reconeix indiscutiblement cinc grans episodis d'aquest tipus durant els darrers 500 milions d'anys.

La més coneguda de totes aquestes extincions massives és la de finals del Cretaci, data- da en uns 66 milions d'anys enrere, i famosa per haver posat punt final a l'existència de tots els dinosaures excepte aquells que havien desenvolupat ales amb plomes i que actualment coneixem com a aus. Tanmateix, tenim constància d'extincions massives prèvies a finals del Triàsic (fa 199 Ma), Permian (fa 251 Ma), Devonian (fa 359 Ma) i Ordovician (fa 443 Ma). Tots aquests capítols de desaparició d'espècies tenen trets en comú, però causes diverses. Donat que molts biòlegs i ambientòlegs en l'àmbit mundial parlen d'una pèrdua de biodiversitat dràstica en les darreres dècades, conèixer les característiques d'aquests moments d'extinció massiva esdevé cabdal per saber si actualment ens trobem immersos en un d'aquests moments, o si es tracta d'un procés natural sense transcendència real.

■ Què caracteritza una extinció massiva?

L'extinció és la desaparició d'una espècie (o d'un conjunt d'espècies), i es materialitza en el moment en què mor l'últim individu d'aquesta espècie. A diferència del seu procés antagònic, l'especiació, que acostuma a ser relativament lent i gradual, l'extinció és en el terreny teòric

un moment puntual i nítid. La realitat, no-gensmenys, és que ni en processos actuals ni en el registre fòssil és fàcil detectar el moment exacte d'extinció d'una espècie. Així com els últims individus d'una espècie actual poden acabar morint en llocs amagats i passar despercebuts al coneixement humà o els monitoratges de conservació específics, els darrers exemplars d'una espècie del passat poden haver-ho fet sense deixar cap evidència fòssil en els darrers milers d'anys de la seva existència. En qualsevol cas, resulta intuïtiu pensar que si una espècie ha format part del registre fòssil de manera ininterrompuda durant un interval de temps, la seva immediata absència en un registre geològic sense hiatus sedimentari sigui propera al moment real de la seva desaparició (extinció).

Potser més important que arribar a conèixer el moment exacte de la desaparició de les espècies és determinar el ritme al qual s'extingeixen en condicions «normals». Aquest ritme o velocitat d'extinció es pot calcular segons grups taxonòmics o moments geològics, però cal expressar-lo sempre en forma de fracció per unitat de temps. Aquest valor indica quantes espècies desapareixen cada any entre totes les que existeixen. Sovint es fa servir el valor E/MSY (#Extinctions / Million of Species each Year). Per exemple, entre els mamífers el ritme mitjà d'extinció durant el cenozoic ha estat d'1,8 E/MSY (Ceballos *et al.*, 2015), mentre que en mol·luscs marins per un període semblant està acotat entre 0,1 i 1 E/MSY. Quan els ritmes d'extinció mantenen valors d'aquest ordre de magnitud, parlem d'extincions de fons (o *background extinctions*, en anglès). És en el moment que el registre fòssil mostra increments anòmals en aquests valors (sovint de diversos ordres de magnitud) que es considera la possibilitat de trobar-nos davant un capítol d'extinció massiva (o *mass extinction*, en anglès), com ja s'ha comentat anteriorment.

Les extincions massives, per definició, reuneixen tres característiques: una pèrdua del 75% de les espècies (com a mínim), una afectació global i una durada relativament curta a escala geològica (sovint per sota del milió d'anys de rigor). L'abast, és a dir, el tant per cent

d'espècies que desapareixen durant una extinció massiva, serà sempre, conseqüentment, un valor comprès entre aquest 75% que representaria l'extinció de tres de cada quatre espècies durant els moments de crisi i el 100% que significaria l'aniquilació total de la vida a la Terra, i que, afortunadament, no s'ha esdevingut mai. L'afectació es relaciona amb el fet que el capítol d'extinció afecti tots els ecosistemes marins o terrestres de manera significativa; si la crisi biològica queda restringida només a un tipus d'ambient molt concret, per molt greu que hagi estat, no rep la catalogació d'extinció massiva, sinó més aviat d'esdeveniment catastròfic restringit o d'extinció regional. Finalment, si l'esdeveniment s'allarga en el temps, el ritme d'extincions queda diluït i els processos d'especiació poden arribar a compensar d'alguna manera les desaparicions que han tingut lloc.

Catalogar l'abast i/o determinar la durada exacta d'un capítol d'extinció massiva pot no ser una tasca gens fàcil. És per això que diferents autors discrepen en la magnitud i posició que cada capítol d'extinció massiva hauria d'ocupar en una hipotètica classificació segons la gravetat. Malgrat tot, existeix consens generalitzat que la primera posició en qualsevol rànquing l'ocupa l'extinció de finals del Permian, aquell que marca el trànsit del Paleozoic al Mesozoic fa uns 251 milions d'anys, i que és considerat el moment més crític viscut per la biosfera durant tot el Fanerozoic. De la resta d'extincions massives catalogades com a tals i àmpliament acceptades per la comunitat científica en trobem diferents causes i estimacions de durada i abast taxonòmic. Tot seguit s'exposen algunes de les dades bàsiques publicades en diferents treballs sobre cadascuna d'aquestes extincions massives.

■ Extinció de l'Ordovicià

Considerada la primera (més antiga) de les cinc grans extincions massives del Fanerozoic, aquest capítol va tenir lloc fa entre 445 i 444 milions d'anys. Aquest moment (conegut com a Hirnantia) registra dues importants glaciacions separades per un interval d'aproximada-

ment mig milió d'anys. Pel que fa a l'abast, es calcula una pèrdua total del 86% de les espècies i entre el 49 i el 61% dels gèneres (Bond; Grasby, 2017 i referències incloses), amb l'agreujant que en aquell moment la vida macroscòpica quedava pràcticament restringida al medi aquàtic. Associat al consegüent canvi de temperatures, també s'invoquen freqüentment alteracions en la quantitat d'oxigen de les aigües marines, amb fenòmens d'anòxia i euxínia combinades amb dràstiques pujades i baixades del nivell eustàtic. Alternativament també es va suggerir la possibilitat d'una extraordinària pluja de raigs gamma d'origen extraterrestre com a possible detonant de la pèrdua de biodiversitat de l'Ordovicià, basant-se en els patrons d'extinció. Aquesta hipòtesi, tanmateix, ha estat poc acceptada per la comunitat científica vista la dificultat de trobar proves empíriques inequívokes en el registre geològic.

■ Extinció del Devonian

Relegada a una posició molt modesta dins els rànquings de les extincions massives, aquest capítol sembla respondre a un cúmul de condicionants ambientals coincidents en un marge considerable de temps, on el trànsit del Frasnian al Famènià sembla que fou el moment més determinant. No existeix consens generalitzat en el moment que caldria considerar inici i final de la crisi biòtica, atès que es detecten diferents moments d'anòxia generalitzada als fons oceànics i polsos transgressius importants durant bona part del Devonian. A més, les extincions de diversos grups queden esglaonades de tal manera que alguns autors han dubtat en catalogar aquest esdeveniment de veritable «extinció massiva». Malgrat tot, es calcula en un 75% la pèrdua total d'espècies i un 35% dels gèneres existents en començar la crisi. Com a factors a tenir en compte, cal considerar canvis importants en la temperatura mitjana global, amb una tendència al refredament seguida d'un sobtat escalfament final estimat en una pujada de 9 °C en què les primeres plantes arborescents terrestres i el vulcanisme, respectivament, haurien jugat un paper rellevant.

■ Extinció del Permian

Coneguda popularment com «la mare de totes les extincions», el capítol de finals del Permian marca un abans i un després en la història de la vida a la Terra i configura el trànsit entre l'era Paleozoica i la Mesozoica. Es calcula una pèrdua total del 56% dels gèneres i el 96% de les espècies existents fins aleshores, tot i que la repercussió als medis continentals s'estima en «només» un 75%. Precedida per una crisi prèvia nou milions d'anys abans, la del Capitanian (o Guadalupian), que alguns autors proposen més important que la del Devonian (Rampino; Shen, 2019), el detonant de la gran crisi biòtica del Permian sembla haver estat indiscutiblement un vulcanisme sostingut en el temps durant centenars de milers d'anys (Burgess; Bowring, 2015) amb nefastes conseqüències en el clima mundial i l'alteració de tots els cicles biogeoquímics del moment, principalment el del carboni. Diferents autors han fet referència a processos secundaris derivats en major o menor grau d'aquest vulcanisme localitzat a la zona de l'actual Sibèria ('trapps siberians') entre els quals destaquen l'acidificació oceànica (Clarkson *et al.*, 2015), la contaminació dels fons marins amb metalls pesants (Grasby *et al.*, 2015), la interacció de cossos ignis amb dipòsits de matèria orgànica sedimentària acumulada (Ogden; Sleep, 2012), l'activació de rutes metabòliques microbianes metanogèniques (Rothman *et al.*, 2014), l'increment de l'activitat fúngica als continents (Visscher *et al.*, 1996) i l'alliberament d'hidrats de metà retinguts als sediments marins (Brand *et al.*, 2016), entre molts altres fenòmens de retroalimentació positiva menys coneguts (Bond; Grasby, 2017; fig. 5).

■ Extinció del Triàsic

La literatura sobre aquest episodi no és tan abundant com la d'altres esdeveniments d'extinció massiva, tot i que s'accepta generalment que la crisi biòtica arrela en l'activació de la «província magmàtica atlàntica central» (CAMP, per les seves sigles en anglès), just en el moment en què l'oceà Atlàntic comença a

obrir-se fragmentant l'antic continent unificat de Pangea. Les causes exactes i el paper que ha tingut el diòxid de carboni durant aquest episodi ha estat motiu de recents publicacions (Capriolo *et al.*, 2020; Fox *et al.*, 2020). En qualsevol cas, sembla provat un increment de la temperatura global i una probable acidificació dels oceans que va provocar un enduriment de les condicions de vida als continents i els oceans, i va portar a l'extinció el 47% dels gèneres i el 80% de les espècies existents fins aquell moment.

Extinció del Cretaci

L'extensa literatura sobre aquest episodi no deixa d'aportar dades significatives amb una certa freqüència des del descobriment d'una inusual concentració d'iridi als nivells de trànsit entre el Cretaci i el Paleocè. Aquesta descoberta va ser interpretada com el resultat d'un impacte meteorític de gran mida amb la Terra (Álvarez *et al.*, 1980) i des d'aleshores les evidències en favor d'aquesta hipòtesi han anat acumulant-se. En aquest sentit, destaca la descoberta del lloc d'impacte (Hildebrand *et al.*, 1991) amb grans detalls sobre la natura i els efectes del xoc inicial (Gulick *et al.*, 2019). Una excel·lent revisió de les causes i conseqüències d'aquest capítol d'extinció i la literatura més destacada al respecte es pot trobar a Schulte *[et al.]* (2010). Per la seva banda, Brusatte *[et al.]* (2015) proporciona una bona síntesi de la literatura específica referent a l'extinció dels dinosaures (no avians), sense cap mena de dubte el grup d'organismes més popular entre tots els damnificats d'aquest dramàtic episodi. Segons les dades disponibles l'extinció va fulminar aproximadament el 75% de les espècies i el 40% dels gèneres existents a finals de l'era Mesozoica (Bond; Grasby, 2017). Comptant amb un abast relativament modest (equivalent al valor de tall per ser considerada una extinció massiva), aquest capítol destaca pels seus desmesurats valors en la velocitat de pèrdua d'espècies de centenars de milers d'E/MSY (Barnosky *et al.* 2011), i que probablement quedarien limitats als moments inicials del xoc meteorític.

El moment actual, es pot catalogar d'extinció massiva?

Un cop recollides les dades més significatives sobre els capítols d'extinció massiva evidenciats en el registre fòssil del Fanerozoic, sembla pertinent fer-se la pregunta sobre si el moment actual pot ser catalogat com una crisi de biodiversitat comparable a algun d'aquests cinc capítols, o si es tractaria més aviat d'una tendència natural equiparable a una etapa d'extinció de fons. Per tal de respondre aquesta pregunta cal fer esment de diferents estudis i dades, malauradament sense poder fer un recull exhaustiu de tots els articles publicats al respecte.

En primer lloc, cal tenir en compte que es desconeix la quantitat exacta d'espècies que viuen actualment al nostre planeta. Tot i haver catalogat adequadament més d'un milió de formes de vida diferents, la diversitat total s'estima al voltant dels nou milions d'espècies (Mora *et al.*, 2011). El fet és que desconèixer gairebé el 90% de les espècies que existeixen actualment dificulta establir el ritme al qual desapareixen, si bé alguns grups d'organismes actuals són ben coneguts i el seguiment de les seves poblacions permet calcular el ritme d'extinció d'espècies de manera prou fidedigna. Entre aquests grups es troben la major part de vertebrats, cnidaris, mol·luscs i plantes (Barnosky *et al.*, 2011; Ceballos *et al.*, 2015). Gràcies al seguiment fet regularment per tots els grups de treball que hi col·laboren, la International Union for Conservation of Nature publica un llistat actualitzat (Red List) on es detalla l'estat de conservació de les poblacions de milers d'espècies al món. Les dades d'aquest llistat (IUCN, 2021) revelen que es troben amenaçades 9.914 espècies de vertebrats (d'un total de 54.807 espècies estudiades), 237 espècies de coralls (d'un total de 864 estudiades), 2.305 espècies de mol·luscs (d'un total de 8.881 estudiades) i 21.726 espècies de plantes (d'un total de 54.127 estudiades). Segons la trajectòria projectada amb base a espècies extintes i amenaçades en diferent grau, l'extinció del 75% de les espècies de molts d'aquests grups podria tenir lloc en els pròxims segles (Barnosky *et al.*, 2011).

Aquesta dinàmica destructiva dels ecosistemes es manifesta de diferents maneres a escala mundial, tals com l'increment de la freqüència d'esdeveniments de mortalitat massiva (Fey *et al.*, 2015), un desequilibri antròpic de la biomassa natural (Bar-On *et al.*, 2018) o el declivi dels grans herbívors a tots els continents (Ripple *et al.*, 2015). No sembla, per tant, forassenyat que algunes veus dins la comunitat científica fins i tot comencin a considerar la recent pandèmia de la COVID-19 com un dels primers efectes palpables sobre la salut humana derivat de la pèrdua de biodiversitat en augmentar el risc de zoonosi.

A escala regional i local, les manifestacions més evidents dels desequilibris ecològics són les invasions d'espècies al·lòctones que exterminen formes endèmiques per depredació, transmissió de malalties o competència interespecífica. A Catalunya en concret, els darrers anys s'han testimoniats importants desequilibris ecològics. Entre les espècies invasores més destacades hi ha aquelles que han conquerit els litorals i sistemes deltaics (*Callinectes sapidus* o cranc blau, *Pomacea maculata* o caragol poma), els sistemes fluvials (*Dreissena polymorpha* o musclo zebra, *Austroptamobius pallipes* o cranc de riu americà), els boscos (*Vespa velutina* o vespa asiàtica, *Cydalima perspectalis* o papallona del boix) i fins i tot alguns ambients urbans (*Aedes albopictus* o mosquit tigre, *Linepithema humile* o formiga argentina). Totes aquestes espècies (i moltes altres formes macroscòpiques i patògens) que han arribat des de diferents parts del món alteren significativament l'equilibri dels ecosistemes naturals regionals i fan minvar les poblacions d'organismes autòctons (sovint fins la seva desaparició total) o en forcen el desplaçament territorial.

Com a conclusió final es pot dir que la situació actual en referència a la biodiversitat és preocupant en tant que molts factors implicats en extincions massives del passat es troben actius i les projeccions a curt i mitjà termini no són gaire esperançadores. Si bé l'abast total de desaparició d'espècies actuals encara no ha arribat al 75%, el ritme de pèrdua s'estima entre les 100 i les 1000 E/MSY (Steffen *et al.*, 2015), de manera que supera en diversos or-

dres de magnitud la velocitat de tots els capítols d'extinció massiva previs amb l'excepció de la crisi de finals del Cretaci. La superació d'alguns llindars ambientals (*tipping points*) com el canvi climàtic, l'acidificació dels oceans, la pèrdua d'aigua dolça disponible o la reducció de zones boscoses inalterades podria accelerar fins al col·lapse els ecosistemes a escala global en les dècades vinents, i fer inútil qualsevol intent d'evitar la primera extinció massiva des de la desaparició dels dinosaures, ara fa 66 milions d'anys.

Agraïments

Aquest article compta amb el suport de l'Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca, Generalitat de Catalunya (2017 SGR 960) i l'Agència Estatal de Investigació, Ministerio de Ciencia e Innovación (PID2020-117289GB-I00, AEI-FEDER EU).

Referències bibliogràfiques

- ALVAREZ, Luis W. [*et al.*] (1980). Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction. *Science* V208, N4448, 1095-1108.
- BAR-ON, Yinon M. [*et al.*] (2018). The biomass distribution on Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences* V115, N25, 6506-6511.
- BARNOSKY, Anthony D. [*et al.*] (2011). Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature* V471, 51-57.
- BOND, David P.G.; GRASBY, Stephen E. (2017). On the causes of mass extinctions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* V478, 3-29.
- BRAND, Uwe [*et al.*] (2016). Methane Hydrate: Killer cause of Earth's greatest mass extinction. *Palaeoworld* V25, 496-507.
- BRUSATTE, Stephen L. [*et al.*] (2015). The extinction of the dinosaurs. *Biological Reviews* V90, N2, 628-642.

- BURGESS, Seth D.; BOWRING, Samuel A. (2015). High-precision geochronology confirms voluminous magmatism before, during, and after Earth's most severe extinction. *Science Advances* V1, N7, 14 p. DOI: 10.1126/sciadv.1500470.
- CAPRIOLO, Manfredo [et al.] (2020). Deep CO₂ in the end-Triassic Central Atlantic Magmatic Province. *Nature Communications* V11, N1670, 11 p. doi.org/10.1038/s41467-020-15325-6.
- CLARKSON, Matthew O. [et al.] (2015). Ocean acidification and the Permo-Triassic mass extinction. *Science* V348, N6231, 229-232.
- CEBALLOS, Gerardo [et al.] (2015). Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science Advances* V1, N5, 5 p. DOI: 10.1126/sciadv.1400253.
- FEY, Samuel B. [et al.] (2015). Recent shifts in the occurrence, cause, and magnitude of animal mass mortality events. *Proceedings of the National Academy of Sciences* V112, N4, 1083-1088.
- FOX, Calum P. [et al.] (2020). Molecular and isotopic evidence reveals the end-Triassic carbon isotope excursion is not from massive exogenous light carbon. *Proceedings of the National Academy of Sciences* V118, N48, 30171-30178.
- GRASBY, Stephen E. [et al.] (2015). Progressive environmental deterioration in northwestern Pangea leading to the latest Permian extinction. *Geological Society of America Bulletin* V127, N9-10, 1331-1347.
- GULICK, Sean P.S. [et al.] (2019). The first day of the Cenozoic. *Proceedings of the National Academy of Sciences* V116, N39, 19342-19351.
- HILDEBRAND, Alan R. [et al.] (1991). *Chicxulub Crater: A possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatán Peninsula, Mexico*.
- HUBLIN, Jean-Jacques [et al.] (2017). New fossils from Jebel Irhoud, Morocco and the pan-African origin of *Homo sapiens*. *Nature* V546, 289-292.
- IUCN (2021). *The IUCN Red List of Threatened Species*. Version 2021-1. <https://www.iucnredlist.org>. [Darrera versió consultada: 30/06/2021].
- MORA, Camilo [et al.] (2011). How many species are there on Earth and in the Ocean? *PLoS Biology* V9, N8, 8 p. e1001127.
- OGDEN, Darcy E.; SLEEP, Norman H. (2012). Explosive eruption of coal and basalt and the end-Permian mass extinction. *Proceedings of the National Academy of Sciences* V109, N1, 59-62.
- RAMPINO, Michael R.; SHEN, Shu-Zhong (2019). The end-Guadalupian (259.8 Ma) biodiversity crisis: the sixth major mass extinction? *Historical Biology* V33, N5, 716-722.
- RIPPLE, William J. [et al.] (2015). Collapse of the world's largest herbivores. *Science Advances* V1, N4, 12 p. DOI: 10.1126/sciadv.1400103.
- ROTHMAN, Daniel H. [et al.] (2014). Methanogenic burst in the end-Permian carbon cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences* V111, N15, 5462-5467.
- SCHULTE, Peter [et al.] (2010). The Chicxulub Asteroid Impact and Mass Extinction at the Cretaceous-Paleogene Boundary. *Science* V327, N5970, 1214-1218.
- STEFFEN, Will [et al.] (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* V347, N6223. Doi: 10.1126/science.1259855.
- VISSCHER, Henk [et al.] (1996). The terminal Paleozoic fungal event: Evidence of terrestrial ecosystem destabilization and collapse. *Proceedings of the National Academy of Sciences* V93, 2155-2158.