

# DE DESERT NUCLEAR A LABORATORI EVOLUTIU

## Respostes dels organismes vius a la radiació ionitzant a Txernòbil

GERMÁN ORIZAOLA

L'accident ocorregut en 1986 a la central nuclear de Txernòbil (Ucraïna) va causar el major alliberament de material radioactiu degut a l'activitat humana. Les previsions inicials van considerar que la zona afectada per la contaminació radioactiva quedaria desproveïda de vida durant mil·lennis. Tres dècades després, la biodiversitat de la zona s'ha recuperat completament i a Txernòbil viuen tots els grans mamífers de l'est d'Europa i més de 200 espècies d'ocells. Els mecanismes que permeten als organismes viure en aquesta zona són encara objecte d'estudi i controvèrsia. En l'actualitat no hi ha consens científic sobre l'impacte a mitjà o llarg termini de la radiació sobre la naturalesa de la zona. La investigació a Txernòbil és bàsica per a entendre els efectes de la contaminació radioactiva sobre la biodiversitat, a més de constituir un laboratori natural excel·lent per a l'estudi de processos ecoevolutius en resposta a l'activitat humana.

Paraules clau: ecologia, evolució, adaptació, mutació, radioactivitat, Txernòbil.

Vivim envoltats de radioactivitat. Aquesta radioactivitat procedeix fonamentalment dels raigs còsmics que arriben a la Terra i d'elements radioactius naturals continguts en l'escorça terrestre. A més de la radioactivitat natural, els organismes vius podem estar exposats a radioactivitat d'origen artificial, generada per l'activitat humana. La radioactivitat artificial es produeix, entre altres motius, per a utilitzar-la en proves mèdiques, per a la producció d'armament o en processos de generació d'energia en centrals nuclears. Accidents com els esdevinguts a les centrals nuclears de Txernòbil (Ucraïna) en 1986 i de Fukushima (Japó) en 2011 representen els casos més notables d'alliberament de materials radioactius al medi ambient a conseqüència de l'acció humana.

### ■ L'ACCIDENT NUCLEAR DE TXERNÒBIL

El 26 d'abril de 1986, a la 1.23 h, el reactor número 4 de la central nuclear de Txernòbil va explotar durant unes proves tècniques de seguretat. Fallades en el disseny del reactor i en la manipulació van conduir a un sobrees-

calfament del nucli que va provocar una explosió que va destruir la coberta protectora del reactor. Durant l'accident es van produir diversos incendis, fonamentalment en les barres de grafit del reactor, que van estar actius durant nou dies i que van causar la dispersió d'enormes quantitats de material radioactiu. S'estima que durant l'accident es va alliberar a l'ambient una quantitat de radiació equivalent a 400 vegades l'alliberada per la bomba atòmica llançada sobre Hiroshima (Japó) en 1945. Aquest ha estat, sens dubte, el major accident nuclear de la història.

Immediatament després de l'accident van començar les labors de contenció i neteja. Es va evacuar tots els residents en un radi d'uns 30 km al voltant de la central nuclear. En total, en successives operacions, unes 350.000 persones van ser evacuades de zones pròximes a la central a Ucraïna i Bielorússia. A conseqüència de l'accident, es va crear una zona d'exclusió d'accés restringit d'uns 4.700 km<sup>2</sup>, en la qual es va prohibir l'assentament humà permanent. Aquestes condicions es continuen mantenint en l'actualitat.

**«A conseqüència de l'accident de Txernòbil, es va crear una zona d'exclusió d'uns 4.700 km<sup>2</sup>, en la qual es va prohibir l'assentament humà permanent»**

L'impacte inicial de l'accident sobre la naturalesa de la zona va ser sever en aquelles àrees que van rebre les dosis de radiació més altes. Aquest impacte de la fase aguda de l'accident va ser especialment notable en una zona de pineda adjacent a la central nuclear. En aquella zona els pins van morir a l'instant i totes les acícules es van tornar roges, el que va donar a tota la zona l'aspecte pel qual se la coneix des de llavors, el Bosc Roig (Red Forest). No obstant això, en altres àrees de la Zona d'Exclusió els nivells de radiació a què van estar exposats plantes i animals van ser molt més baixos.

La idea general en el moment de l'accident era que la zona afectada quedaria desproveïda de vida durant centenars i fins i tot milers d'anys. Txernòbil es convertiria en un desert nuclear inhabitable. Aquesta visió es basava en la llarga vida mitjana d'alguns dels isòtops radioactius alliberats durant l'accident, com els isòtops de plutoni-239, amb una vida mitjana d'uns 24.000 anys.

En l'actualitat, 33 anys després de l'accident, la Zona d'Exclusió de Txernòbil acull poblacions de totes les espècies de grans mamífers de l'est d'Europa (os bru, llop, linx europeu, cavall de Przewalski, ant, castor, llúdria...) i més de 200 espècies d'ocells, entre moltes espècies més. La superfície de bosc s'ha estès i ha ocupat àmplies àrees abans aprofitades per a l'agricultura. La zona està clarament molt lluny de ser un desert nuclear. Aquesta contradicció planteja preguntes científiques de gran interès: Com és possible que tots aquests organismes visquen a Txernòbil? Quins són els mecanismes que els permeten mantenir-se en una zona contaminada per material radioactiu com Txernòbil?

## ■ LA CONTAMINACIÓ RADIOACTIVA A TXERNÒBIL

Per a entendre els efectes sobre el medi ambient d'un accident nuclear com el de Txernòbil, cal conèixer, en primer lloc, la diferent naturalesa dels isòtops radioactius alliberats i la seua distribució en el medi ambient. Un primer aspecte important és el tipus de substàncies radioactives alliberades a l'entorn. Un dels isòtops més abundants immediatament després de l'explosió va ser l'isòtop de iode-131, generador de radiació beta d'alta energia, amb gran potencial carcinogènic (especialment lli-



German Orlaola

El 26 d'abril de 1986, el reactor número 4 de la central nuclear de Txernòbil va explotar en plena matinal durant unes proves tècniques de seguretat. S'estima que durant l'accident es va alliberar a l'ambient una quantitat de radiació equivalent a 400 vegades l'alliberada per la bomba atòmica llançada sobre Hiroshima (Japó) en 1945. A conseqüència de l'accident es va crear una zona d'exclusió d'accés restringit d'uns 4.700 km<sup>2</sup>, en la qual es va prohibir l'assentament humà permanent. Aquestes condicions es continuen mantenint en l'actualitat. En la imatge, vista del reactor 4 de Txernòbil en setembre de 2016.

**«La idea general en el moment de l'accident era que la zona afectada quedaria desproveïda de vida durant centenars, i fins i tot milers d'anys»**

gat al càncer de tiroïdes), però amb una vida mitjana molt curta, de tan sols vuit dies. És a dir, escasses setmanes després de l'accident aquests isòtops havien desaparegut de la zona. Aquells isòtops que tenen una vida mitjana calculada en milers d'anys, com el plutoni-239, generen una radiació alfa de baixa energia,

amb escassa capacitat de penetració (és a dir, la pell els para), i per tant són poc perillosos per irradiació externa. En l'actualitat, les principals fonts de contaminació són degudes a isòtops de cesi-137 i estronci-90. Aquests isòtops són emissors de radiació gamma d'energia mitjana i partícules beta d'alta energia, tenen major capacitat de penetració i una vida mitjana d'uns trenta anys. És a dir, la meitat de tots els compostos d'aquest tipus generats durant l'accident nuclear ja s'haurien desintegrat i desaparegut de l'ambient.

Un altre aspecte molt important que cal tenir en compte a Txernòbil, i que s'oblida amb molta freqüència, és com es distribueix la contaminació radioactiva en el paisatge. En l'actualitat, només un petit percentatge de la Zona d'Exclusió manté nivells alts de radioactivitat (prop d'un 30%). Fins i tot, dins d'aquestes zones els nivells de radiació poden variar en diversos ordres de magnitud





Germanà Orzáola

La contaminació radioactiva es distribueix de manera desigual en el paisatge de Txernòbil. En l'actualitat, només un petit percentatge de la Zona d'Exclusió manté nivells alts de radioactivitat, i fins i tot dins d'aquesta zona els nivells de radiació varien. En la imatge, el llac Gluboke, una de les zones amb major contaminació de la Zona d'Exclusió de Txernòbil.

en una escala d'escassos metres. Aquesta distribució tan a pedaços de la contaminació radioactiva evita que la gran majoria d'organismes estiga constantment exposada a nivells alts de radiació.

#### ■ EFECTES DE LA RADIACIÓ SOBRE ELS ORGANISMES

La radiació ionitzant, com la generada en l'accident nuclear de Txernòbil, pot causar danys en les cèl·lules dels organismes. El mal cel·lular es genera quan les partícules radioactives impacten amb molècules orgàniques, en particular amb l'ADN. Aquestes interaccions amb l'ADN poden ser directes o indirectes. L'ADN de les cèl·lules es pot veure afectat de manera directa per la radiació ionitzant quan partícules de radiació alfa o beta incideixen físicament sobre els brins d'ADN i provoquen el seu trencament, simple o doble. Una altra alternativa és que l'ADN es veja afectat de manera indirecta, fet que ocorre quan les partícules radioactives incideixen sobre molècules d'aigua i altres molècules orgàniques i creen radicals lliures que poden reaccionar amb l'ADN i generar al seu torn danys estructurals.

Els efectes causats per aquests danys en l'ADN són molt diversos. El nivell de dany depèn del fet que aquest siga o no detectat i reparat per la maquinà-

ria de reparació cel·lular. La reparació pot funcionar sense fallades i per tant sense que es genere cap efecte, però també pot funcionar de manera imperfecta i generar mutacions. En aquest segon cas, els canvis produïts en la seqüència de nucleòtids poden ser sinònims (alteracions en la seqüència d'ADN sense que ocasione un canvi en l'aminoàcid produït) i per tant no generar efectes funcionals, o canvis no sinònims que modifiquen la seqüència d'aminoàcids i sí que poden alterar l'estructura i funció dels gens. L'acumulació de mutacions no sinònimes en qualsevol organisme està associada a canvis en el metabolisme i la proliferació cel·lular, així com a alteracions en l'expressió gènica, processos de senescència cel·lular o al desenvolupament de respostes cancerígenes. Si els danys són abundants o no són corregits, poden afectar el manteniment i replicació de les cèl·lules, alterar-ne el funcionament i fins i tot generar la mort cel·lular. Si un nombre alt de cèl·lules d'un organisme mor, es pot arribar

a produir la mort d'aquest individu.

Un aspecte que poques vegades es té en compte, i que té una gran rellevància evolutiva, és que, atesa l'alta taxa de generació de mutacions aleatòries produïdes per la radiació ionitzant, aquesta contribueix també a incrementar la variabilitat genètica a escala poblacional a un ritme molt més elevat de l'habitual. Aquest augment ràpid de la variabilitat genètica, combinat amb la presència d'un agent selectiu tan potent com la radiació, hauria d'afavorir l'aparició de processos intensos de selecció natural. A més, pot generar l'aparició de mutacions beneficioses, de caràcter adaptatiu, que permeten a un organisme afrontar amb contaminació radioactiva. En aquest sentit, la radiació pot estar ajudant a generar precisament la diversitat genòmica necessària per a afrontar la radiació, i alguns estudis han suggerit la possible aparició a Txernòbil de processos d'adaptació a l'exposició crònica a contaminació radioactiva (Galván et al., 2014; Møller i Mousseau, 2016).

En definitiva, el nombre i el tipus de canvis que experimenta un individu en les seues cèl·lules per efecte de la radiació ionitzant, així com els processos selectius associats, determinaran finalment el nivell d'impacte de la radiació sobre aquells organismes i les seues poblacions.

#### ■ LA NATURALESA DE TXERNÒBIL I LA RADIACIÓ

Durant els primers mesos després de l'explosió en la central nuclear de Txernòbil es van registrar efectes negatius importants en la fauna i vegetació de les àrees



més afectades per la contaminació radioactiva (UNSCEAR, 1996). Es va registrar un augment de la taxa de mortalitat en diversos grups d'animals i plantes, així com diferents danys morfològics, fisiològics i alteracions genòmiques (Yablokov, Nesterenko i Nesterenko, 2009). Tots aquests fenòmens van comportar una reducció de les poblacions en les àrees exposades a alta radiació.

Estudis posteriors, centrats fonamentalment en ocells, van trobar altres efectes negatius de la radiació a escala individual. Per exemple, individus que vivien en les zones amb majors nivells de contaminació radioactiva presentaven alteracions morfològiques com un increment de leucisme (presència de plomes blanques) o presència de tumors, una reducció dels nivells de resposta immune, i diverses alteracions reproductives i genètiques (Møller i Mousseau, 2006). A més, altres treballs van mostrar una menor abundància de diversos grups animals en les zones de major contaminació radioactiva (Mousseau i Møller, 2014). No obstant això, molts d'aquests estudis han estat criticats per presentar seriosos problemes metodològics i d'anàlisi, i han generat bastant controvèrsia en la comunitat científica (Beresford, Scott i Copplestone, 2019; Smith, 2007).

Estudis més recents no han trobat efectes significatius de la radiació en una àmplia varietat d'organismes com ara invertebrats aquàtics, saltamartins i fins i tot ocells (Bonisoli-Alquati et al., 2018; Galván et al., 2014; Murphy, Nagorskaya i Smith, 2011). Espècies com l'os bru o el bisó europeu, que no estaven presents a Txernòbil en el moment de l'accident, han recolonitzat la zona. Treballs desenvolupats en la part bielorussa de la Zona d'Exclusió (la Reserva Radioecològica de Polesia) durant 1987-1996 van mostrar, a més, un increment notable de l'abundància de grans mamífers (ant, cabirol, senglar...) al llarg del temps; l'absència de relació entre radioactivitat i abundància d'aquestes espècies, i la presència d'una població de llop amb una densitat set vegades major en aquella zona que en altres reserves naturals del país (Deryabina et al., 2015).

Un cas revelador de la situació actual de la naturalesa en la Zona d'Exclusió de Txernòbil és el dels cavalls de Przewalski. Aquests cavalls salvatges no estaven presents en la zona en el moment de l'accident, però un grup d'uns trenta exemplars va ser alliberat en 1998-1999 amb la intenció que la seua activitat d'alimentació servira per a controlar l'expansió del bosc cap a antigues zones de cultiu. Aquesta població es manté totalment aïllada dins de la Zona d'Exclusió, sense que hi haja la possibilitat de contacte amb cap altre cavall de l'espè-



German Orzabela

Els cavalls salvatges de Przewalski no estaven en la zona de Txernòbil en el moment de l'accident, però a la fi dels noranta un grup d'uns trenta exemplars va ser alliberat perquè per mitjà de la seua alimentació controlaren l'expansió del bosc. Vint anys després de ser introduïts, uns 150 cavalls de Przewalski viuen en la zona i tenen una taxa elevada de reproducció.



German Orzabela

L'impacte inicial de l'accident sobre la naturalesa de la zona va ser sever en les àrees que van rebre les dosis de radiació més altes. Un dels casos més coneguts és el de l'anomenat Bosc Roig, una pineda adjacent a la central nuclear. Quan es va produir l'accident, els pins van morir a l'instant i les acícules es van tornar roges; això va donar a tota la zona l'aspecte pel qual se la coneix des de llavors. En la imatge, un investigador al Bosc Roig de Txernòbil al maig de 2017.



Encara que alguns estudis centrats en ocells van trobar efectes negatius de la radiació en alguns individus que vivien en les zones més contaminades (per exemple, una presència més alta de plomes blanques o de tumors), investigacions més recents no han trobat efectes significatius de la radiació en una àmplia varietat d'organismes com ara invertebrats aquàtics, saltamartins, i fins i tot ocells. En la imatge de l'esquerra, posta d'un carboner comú (*Parus major*), al Bosc Roig de Txernòbil, al maig de 2017. A dalt, una reineta arbòria oriental (*Hyla orientalis*) a Txernòbil, al juny de 2019.

cie des de l'exterior. Vint anys després de ser introduïts a Txernòbil, la població s'ha multiplicat per cinc i uns 150 cavalls de Przewalski viuen en la Zona. Un altre exemple de l'òptim estat d'aquesta població és la seua elevada taxa de reproducció, que va arribar a les 22 cries en 2018.

#### ■ EL FUTUR DE LA INVESTIGACIÓ A TXERNÒBIL

Els resultats contradictoris sobre els efectes de la radiació sobre la naturalesa de Txernòbil deixen clars diversos aspectes. Un, molt evident, és la necessitat de continuar investigant en la Zona, aplicant nous mètodes i tècniques d'estudi, a més d'establir dissenys de mostreig planificats adequadament. Realitzar estudis moleculars del genoma, epigenoma i metagenoma és imprescindible per a determinar el tipus de respostes que els organismes vius desenvolupen enfront de la radiació, i així avaluar correctament l'estat actual de la biodiversitat de Txernòbil. Aquestes tècniques ajudarien, a més, a aprofundir en l'estudi de possibles processos d'adaptació ràpida a l'exposició crònica a contaminació radioactiva.

La investigació a Txernòbil necessita també diferenciar entre efectes detectats a escala individual i efectes en el manteniment de les poblacions. No és infreqüent trobar efectes negatius d'un determinat factor ambiental

quan es treballa amb poblacions naturals, però és necessari determinar el significat biològic d'aquests efectes. En un sistema com Txernòbil és encara més rellevant avaluar la magnitud d'aquests efectes i entendre si afecten o no la capacitat reproductiva dels organismes, i per tant el manteniment de les poblacions.

En aquest context, és imprescindible examinar l'existència d'efectes de la radiació a llarg termini que no interferisquen amb el potencial reproductiu dels organismes. Una major inversió en reparació cel·lular i manteniment en organismes exposats a radiació podria interferir amb altres funcions biològiques i generar efectes com una reducció de l'esperança de vida o l'acceleració de la taxa d'envelliment dels individus. Aquests efectes, no obstant això, podrien permetre el manteniment de taxes de reproducció suficients perquè les dinàmiques poblacionals no es veren afectades.

Un altre aspecte que cal considerar a Txernòbil és la separació

entre efectes de la radiació deguts als nivells de contaminació assolits en 1986, dels quals determinats sistemes no s'han recuperat, com pot ser el cas del Bosc Roig, i els efectes deguts als nivells de contaminació actuals. En el cas del Bosc Roig, considerat en molts estudis com la referència de zona contaminada, és necessària major cautela. Aquesta àrea continua estant sota una influència humana important, atesa la seua proximitat a la central nuclear, a més d'haver experimentat diversos incendis des de 1986 i un evident canvi de paisatge, que ha passat

**«Alguns estudis han suggerit la possible aparició a Txernòbil de processos d'adaptació a l'exposició crònica a contaminació radioactiva»**





de ser una pineda a ser una zona dominada pel bedoll. Per tant, és imprescindible diferenciar tots aquests efectes ecològics dels efectes causats per la radiació *per se*.

A l'hora d'investigar Txernòbil, i també a l'hora de comunicar els resultats de les investigacions a la societat, és molt important diferenciar clarament entre resultats que afecten tota la Zona d'Exclusió de Txernòbil i resultats que es refereixen exclusivament a les zones més altament contaminades (una proporció molt petita del total de la Zona d'Exclusió). D'aquesta manera es podrà donar una visió realista del que podria estar ocorrent al llarg dels diferents nivells de radiació en la Zona. Això és especialment rellevant, ja que en l'actualitat àmplies àrees de la Zona d'Exclusió mantenen nivells de contaminació radioactiva idèntics als nivells de radiació natural (*background radiation*) que es poden trobar en la major part del planeta.

Txernòbil representa també un exemple clar de la complexitat de treballar en escenaris d'investigació en els quals un factor és extraordinàriament dominant. Multitud d'estudis desenvolupats a Txernòbil han examinat exclusivament l'efecte de la radiació sobre la biologia dels organismes vius, i han obviat qualsevol altre factor ambiental de rellevància, com la diversitat d'hàbitats, la proximitat a zones d'activitat humana, o les alteracions que ha experimentat la zona des de 1986. És crucial que els estudis futurs que es desenvolupen en la Zona d'Exclusió tinguin en compte aquests factors per a així poder avançar en el coneixement de la situació de la biodiversitat a Txernòbil.

## ■ TXERNÒBIL COM A LABORATORI NATURAL

Tres dècades després de l'accident en la central nuclear de Txernòbil, una àrea de 4.700 km<sup>2</sup> al voltant de la central continua sent una zona amb prohibició d'assentament humà permanent, incloent-hi la Zona d'Exclusió de Txernòbil a Ucraïna i la Reserva Radioecològica Estatal de Polèsia a Bielorússia. L'efecte beneficiós de l'absència d'humans en aquesta zona s'ha suggerit com un dels factors clau que estan permetent l'assentament de poblacions animals diverses i abundants, malgrat l'existència encara de zones contaminades per substàncies radioactives.

Aquesta absència d'interferència humana fa que Txernòbil constituïska, des del punt de vista científic, un laboratori natural únic en el qual estudiar les respostes ecoevolutives dels organismes vius enfront d'un factor ambiental extrem d'origen antròpic com la radiació. Però, a més, és un lloc ideal per a l'estudi de processos de successió ecològica, d'iniciatives de renaturalització (*rewilding*), o dels efectes cascada que pot provocar el despoblament humà sobre



Sergey Gaschack & TREE project, University of Salford/ CEH UK



Sergey Gaschack & TREE project, University of Salford/ Centre for Ecology & Hydrology UK

Espècies com l'os bru (A) o el bisó europeu (B), que no estaven presents a Txernòbil en el moment de l'accident, han recolonitzat la zona. Altres mamífers que viuen allí són l'ant (C), el linx europeu (D) o el llop (E). Més de tres dècades després de l'accident, la Zona d'Exclusió de Txernòbil està lluny de ser un desert nuclear. En el futur ha de garantir-se la protecció d'aquesta àrea pel seu interès per a la investigació i la conservació de la biodiversitat.

**«L'absència d'humans s'ha suggerit com un dels factors clau que estan permetent l'assentament de poblacions animals diverses i abundants a la zona»**







B

Sergey Gaschack & TREE project, University of Salford/ CEH UK



D

Sergey Gaschack & TREE project, University of Salford/ Centre for Ecology & Hydrology UK



E

Sergey Gaschack & TREE project, University of Salford/ Centre for Ecology & Hydrology UK

la biodiversitat. Tots aquests estudis poden, a més, servir de model per a treballs que analitzen les respostes dels organismes vius davant d'altres canvis abruptes d'origen antròpic, com l'alteració d'hàbitats naturals, processos d'urbanització o l'impacte d'altres contaminants.

Considerant l'interès científic i social, el futur de Txernòbil hauria de garantir la continuació de la zona com a lloc preferent per a la investigació i la conservació de la biodiversitat. Per a això s'hauria d'assegurar el manteniment de la integritat de la Zona d'Exclusió com a Reserva Radiològica de la Biosfera, tal com va ser declarada pel Govern d'Ucraïna en 2016. Així, una zona que s'esperava que fora un desert per a la vida podrà preservar-se com un refugi únic per als éssers vius en el qual poder continuar estudiant els mecanismes de resposta davant de l'acció (i de l'absència) humana. ☉

#### REFERÈNCIES

- Beresford, N. A., Scott, M., & Copplestone, D. (2019). Field effects studies in the Chernobyl Exclusion Zone: Lessons to be learnt. *Journal of Environmental Radioactivity*, en premsa (proves corregides disponibles en línia). doi: [10.1016/j.jenvrad.2019.01.005](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.01.005)
- Bonissoli-Alquati, A., Ostermiller, S., Beasley, D. A. E., Welch, S. M., Møller, A. P., & Mousseau, T. A. (2018). Faster development covaries with higher DNA damage in grasshoppers (*Chorthippus albomarginatus*) from Chernobyl. *Physiological and Biochemical Zoology*, *91*(2), 776–787. doi: [10.1086/696005](https://doi.org/10.1086/696005)
- Deryabina, T. G., Kuchmel, S. V., Nagorskaya, L. L., Hinton, T. G., Beasley, J. C., Lerebours, A., & Smith, J. T. (2015). Long-term census data reveal abundant wildlife populations at Chernobyl. *Current Biology*, *25*(19), 824–826. doi: [10.1016/j.cub.2015.08.017](https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.08.017)
- Galván, I., Bonissoli-Alquati, A., Jenkinson, S., Ghanem, G., Wakamatsu, K., Mousseau, T. A., & Møller, A. P. (2014). Chronic exposure to low-dose radiation at Chernobyl favours adaptation to oxidative stress in birds. *Functional Ecology*, *28*(6), 1387–1403. doi: [10.1111/1365-2435.12283](https://doi.org/10.1111/1365-2435.12283)
- Mousseau, T. A., & Møller, A. P. (2014). Genetic and ecological studies of animals in Chernobyl and Fukushima. *Journal of Heredity*, *105*(5), 704–709. doi: [10.1093/jhered/esu040](https://doi.org/10.1093/jhered/esu040)
- Møller, A. P., & Mousseau, T. A. (2006). Biological consequences of Chernobyl: 20 years on. *Trends in Ecology and Evolution*, *21*(4), 200–207. doi: [10.1016/j.tree.2006.01.008](https://doi.org/10.1016/j.tree.2006.01.008)
- Møller, A. P., & Mousseau, T. A. (2016). Are organisms adapting to ionizing radiation at Chernobyl? *Trends in Ecology and Evolution*, *31*(4), 281–289. doi: [10.1016/j.tree.2016.01.005](https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.01.005)
- Murphy, J. F., Nagorskaya, L. L., & Smith, J. T. (2011). Abundance and diversity of aquatic macroinvertebrate communities in lakes exposed to Chernobyl-derived ionizing radiation. *Journal of Environmental Radioactivity*, *102*(7), 688–694. doi: [10.1016/j.jenvrad.2011.04.007](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.04.007)
- Smith, J. (2007). Is Chernobyl radiation really causing negative individual and population-level effects on barn swallows? *Biology Letters*, *4*(1), 63–64. doi: [10.1098/rsbl.2007.0430](https://doi.org/10.1098/rsbl.2007.0430)
- UNSCEAR. (1996). Effects of radiation on the environment. *Sources and effects of ionizing radiation (UNSCEAR 1996 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes)*. Nova York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.
- Yablokov, A. V., Nesterenko, V. B., & Nesterenko, A. V. (2009). Consequences of the Chernobyl catastrophe for the environment. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1181*(1), 221–286. doi: [10.1111/j.1749-6632.2009.04830.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04830.x)

**GERMÁN ORIZAOLA.** Doctor en Biologia, treballa com a investigador Ramón y Cajal en l'Àrea de Zoologia de la Universitat d'Oviedo i en la Unitat Mixta d'Investigació en Biodiversitat-UMIB (Universitat d'Oviedo – CSIC – Principat d'Astúries, Espanya). Dirigeix el grup d'investigació en Ecologia Evolutiva en Ambients Extremes de la Universitat d'Oviedo (Espanya). Les seues investigacions se centren actualment en el camp de la radioecologia, amb els amfibis com a principal model d'estudi. ✉ [orizaolagerman@uniovi.es](mailto:orizaolagerman@uniovi.es)