

Introducció a la radioactivitat ambiental

Les fonts de radiació

Els humans no poden sentir la radiació, però la radioactivitat és un fet al planeta Terra. La radiació acompanya l'existència humana sobre la Terra des del seu origen.

Les fonts naturals de radiació

A la Terra els éssers vius estem exposats a les radiacions ionitzants d'origen terrestre i extra-terrestre. La radiació que prové de fora de la Terra s'anomena radiació còsmica.

La radiació còsmica

Hi ha dues principals fonts de radiació còsmica: la galàctica i la solar. Abans que interaccionin amb l'atmosfera de la Terra, ambdós tipus de radiació són bàsicament feixos de protons juntament amb heli i alguns altres ions més pesants.

Els raigs còsmics galàctics tenen el seu origen fora del sistema solar, però ni hi cap teoria acceptada sobre la seva forma de generació. Tenen una energia mitjana de l'ordre de 10^4 MeV, arribant a màxims de 10^{14} MeV. (1 MeV = 10^6 eV i 1 eV és la unitat d'energia a nivell de partícules elementals i correspon a l'energia d'un electró sotmès a una diferència de potencial d'un Volt. 1 eV = $1,6 \times 10^{-19}$ Jouls. 1 Joul = 0,24 calories).

L'altre tipus de radiació còsmica prové del Sol, que emet contínuament partícules de baixa energia, o més energètiques en el cas de les tempestes solars. Tenen una energia inferior a les radiacions galàctiques, i de l'ordre d'entre 1 i 100 MeV. La seva major part no tenen l'energia suficient per travessar al camp magnètic de la Terra.

En entrar a l'atmosfera, les partícules energètiques (bàsicament protons) poden interaccionar amb els gasos atmosfèrics (Nitrogen, Oxigen i Argó) en una gran varietat de reaccions nuclears, que donen neutrons, protons, muons, pions i kaons, i a la vegada, Triti (^3H) i Berili (^7Be). Les partícules secundàries poden ser el suficient energètiques per iniciar altres reaccions, menant cap una cascada d'esdeveniments. La radiació còsmica a la superfície de la Terra comprèn partícules directament ionitzants secundàries, juntament amb una petita fracció de neutrons. L'exposició a la radiació còsmica augmenta amb l'altura sobre el nivell del mar. Hi ha petites variacions amb la latitud (el camp magnètic de la Terra fa que fluxos més grans de protons de baixa intensitat energètica arribin a les capes altes de l'atmosfera, en els pols més que no pas a l'equador).

Les fonts terrestres de radiació

A la crosta de la Terra hi ha materials radioactius. Els radioanúclids naturals es poden dividir en dos grups depenent del seu origen. El primer grup i el més important són els *radionúclids primordials*, que són presents a la Terra des del seu mateix origen. El segon grup són els *radionúclids cosmogènics*, que es formen de manera contínua a les capes altes de l'atmosfera per causa dels raigs còsmics.

Els radionúclids primordials

Aquest grup és responsable de la major part de l'exposició a les radiacions de la amplia majoria de persones. Són: el ^{40}K (Període de Semi-Desintegració $1,28 \times 10^9$ anys), el ^{232}Th (PS-D: $1,41 \times 10^{10}$ anys) i ^{238}U (PS-D: $4,47 \times 10^8$ anys). L'Urani i el Tori són els radionúclids inicials de les seves respectives cadenes de desintegració que donen lloc a altres radionúclids. Un radionúclid dona lloc a un altre, i així fins assolir l'estat estable. Les series de desintegració més importants són les de ^{238}U i de ^{232}Th , essent la del ^{235}U de menor importància. Els radionúclids primordials són llistats a la Taula 1.

Taula 1. Radionúclids primordials

Núclid	Període de semi-desintegració (anys)	desintegració
⁴⁰ K	71,3 x 10 ⁹	Beta
⁵⁰ V	6 x 10 ¹⁴	Beta
⁸⁷ Rb	4,7 x 10 ¹⁰	Beta
¹¹³ Cd	9 X 10 ¹⁵	Beta
¹¹⁵ In	5 x 10 ¹⁴	Beta
¹²³ Te	1,2 x 10 ¹³	CE ^a
¹³⁸ La	1,1 x 10 ¹¹	Beta
¹⁴² Ce	> 5 x 10 ¹⁶	Alfa
¹⁴⁴ Nd	2,1 x 10 ¹⁵	Alfa
¹⁴⁷ Sm	1,1 x 10 ¹¹	Alfa
¹⁴⁸ Sm	8 x 10 ¹⁵	Alfa
¹⁵² Gd	1,1 x 10 ¹⁴	Alfa
¹⁵⁶ Dy	2 x 10 ¹⁴	Alfa
¹⁷⁶ Lu	2,7 x 10 ¹⁰	Beta
¹⁷⁴ Hf	2 x 10 ¹⁵	Alfa
¹⁸⁰ Ta	> 1,6 x 10 ¹³	Beta
¹⁸⁷ Re	5 x 10 ¹⁰	Beta
¹⁹⁰ Pt	7 x 10 ¹¹	Alfa
²⁰⁴ Pb	1,4 x 10 ¹⁷	Alfa
²³⁸ U ^b		
²³⁵ U ^c		
²³² Th ^d		
	^a CE : captura electrònica	
	^{b, c, d} més la cadena de desintegració	

El ⁴⁰K (Potassi-40) és un radionúclid primordial que causa una àmplia i indefugible exposició (però no necessàriament la més elevada). És un emissor beta/gamma. Està present en el potassi natural en una concentració fixa del 0,012%. El Potassi és un element essencial per a la vida i la seva concentració en el cos humà regula el control homeostàtic. Per tant l'exposició al ⁴⁰K és inevitable, però varia amb l'edat i el sexe, d'acord amb els corresponents canvis en la concentració de potassi al cos humà. La presència de ⁴⁰K en els sòls i en les roques és també una font d'exposició externa. Les concentracions de ⁴⁰K en el sòls varien des de 0 (alguns sòls de les illes d'Escòcia) fins a valors superiors a 3.200 Bq/kg de pes en sec (també a les illes d'Escòcia). La UNSCEAR estima que la mitjana mundial de concentració de ⁴⁰K al sòl és de 420 Bq/kg (UNSCEAR, 2000). Les concentracions en roques estan menys estudiades, però solen ser més baixes: entre 4 i 40 Bq/kg s'han detectat en roques de fosfats.

El decaïment de la cadena que encapçala l'²³⁸U és important. L'²³⁸U és un radionúclid que es troba a molts llocs. És present a la major part de materials que es troben a l'entorn i ha sigut àmpliament estudiat en roques i en sòls en les prospeccions d'urani. Els nivells d'²³⁸U varien entre 2 fins a 300 Bq/kg de sòl sec. La mitjana mundial de concentració d'²³⁸U, segons l'UNCEAR és de 33 Bq/kg de pes sec. En indrets on es troben roques uraníferes, com el granit, els nivells d'activitat dels sòls pugen fins a 400 Bq/kg. Alguns sediments i arenisques tenen concentracions de fins a 30.000 Bq/kg i les roques uraníferes tenen nivells de l'ordre de 4.000 Bq/kg que poden arribar fins a 2 x 10⁶ Bq/kg en vetes de materials uranífers. Els nivells a l'aigua del mar són de l'ordre de 0,04 Bq/litre.

Alguns elements de la cadena de l'²³⁸U poden ser ingerits a través de menjar i en algunes situacions poden contribuir de forma significativa la 'exposició humana. A excepció del ⁴⁰K, la més elevada concentració de qualsevol radionúclid en aliments és el ²¹⁰Po en peix i mol·lusc. S'han mesurat nivells de l'ordre del 300 Bq/kg de pes sec en múscles a Cumbria, Regne Unit i França. Fins i tot nivells d'entre 100 i 7.000 Bq/kg de pes sec han sigut mesurats en escamarlans de l'Atlàntic Nord. Determinats radionúclids es concentren en determinats aliments, per exemple el ²²⁶Ra es troba en nivells significants en fulles seques de té i en nous del Brasil, en concentracions de 20 i 100 Bq/kg respectivament.

El ^{226}Ra és un element de la cadena de desintegració de l' ^{238}U . Tot el ^{226}Ra que hi ha present s'ha produït en darrera instància del decaïment de l' ^{238}U , a través del decaïment d'altres radionúclids. El ^{226}Ra es desintegra donant lloc al ^{222}Rn , que contribueix significativament a l'exposició humana. El ^{222}Rn es conegut amb el nom de radó. En ser un gas, s'escapa de la crosta de la Terra cap a l'atmosfera. En un entorn obert, simplement es dispersa i decau, però a l'interior dels edificis s'acumula. En alguns casos el problema s'agreuja pel fet que alguns edificis tenen una lleugera pressió negativa, de forma que es com si xuclessin radó de l'interior de la Terra. De fet, no és pas el radó qui irradia a la gent, sinó alguns dels seus descendents, l'exposició als quals pot causar càncer. Els nivells de radó en els habitatges depèn de la geologia particular de l'indret i de les concentracions d' ^{238}U , o més estrictament, del seu immediat precursor, el ^{226}Ra . Al món, s'han emprés programes extensius de mesura del nivell de radó dins dels edificis i d'identificació de zones geogràfiques de preocupació, des que s'ha reconegut que el radó es una qüestió de salut pública. Al Regne Unit, la concentració mitjana de radó dins les cases és de 20 Bq/m^3 . La UNSCEAR estima que el nivell mitjà ponderat de radó sobre la població del món és d'uns 40 Bq/m^3 , amb una concentració de 4 Bq/m^3 a l'exterior.

El ^{232}Th és una altre radionúclid que origina una altra cadena de desintegració. Generalment es troba en sòls on també hi ha ^{238}U . La UNSCEAR estima que la mitjana mundial de l'activitat del ^{232}Th en sòls és de 45 Bq/kg . Nivells de fins a 180 Bq/kg s'han detectat a Cornwall. A Kerala (Índia) les sorres radioactives tenen activitats de ^{232}Th de fins a 7.000 Bq/kg .

Les normalment baixes activitats dels radionúclids primordials que hi ha a la crosta de la Terra és deguda a que estan en el subsòl, a diferents profunditats, cosa que fa que el recobriment natural faci de blindatge, amb lo qual l'activitat a nivell del sòl és normalment baixa.

Radionúclids cosmogenics

Els raigs còsmics són una forma de radiació ionitzant que s'origina fora de l'atmosfera de la Terra. Aquests raigs produeixen un ampli ventall de radionúclids a l'atmosfera, a la biosfera i a la litosfera, i ho fan mitjançant diverses reaccions nuclears. Els radionúclids formats són els que s'anomenen cosmogenics.

Els quatre radionúclids cosmogenics més importants pel que fa a l'exposició humana són el Triti, el ^7Be , el ^{14}C i el ^{22}Na , tot i que se'n formen molts més (Taula 2). De lluny, el més significant de tots ells és el ^{14}C , que es forma a les capes altes de l'atmosfera per interacció entre els neutrons generats pels raigs còsmics i el ^{14}N , natural i no radioactiu. Aquesta reacció s'anomena *activació*. El ritme de producció anual de ^{14}C natural és d'entre 1.200 i 1.400 TBq (1 TBq = 10^{12} Bq). L'activitat específica del ^{14}C és 230 Bq/kg de carboni. La major part de la resta de radionúclids cosmogenics es produeix quan els nuclis d'àtoms existents a l'atmosfera s'esberlen degut al xoc amb partícules d'alta energia. Aquest procés s'anomena *spallation*. L'inventari global dels radionúclids cosmogenics importants es dona a la Taula 3.

Taula 2. Radionúclids cosmogenics

Radionúclid	Període de semi-desintegració (anys) ^a	Desintegració ^b
^3H	12,26	Beta
^7Be	0,15	CE ^c
^{10}Be	$1,6 \times 10^6$	Beta
^{14}C	$5,73 \times 10^3$	Beta
^{22}Na	2,6	CE ^c
^{26}Al	$7,4 \times 10^5$	CE ^c
^{32}Si	280	Beta
^{32}P	0,04	Beta
^{33}P	0,07	Beta
^{35}S	0,24	Beta
^{36}Cl	$3,01 \times 10^5$	Beta
^{39}Ar	269	Beta
^{81}Kr	$2,29 \times 10^5$	CE ^c

a	Amb dues xifres decimals	
b	Desintegració primària	
c	CE : captura electrònica	

Taula 3. Inventari global dels radionúclids cosmogenics més importants (UNSCEAR, 2000)

Radionúclid	Inventari (PBq) ^a
³ H	1,3 x 10 ³
⁷ Be	413
¹⁰ Be	230
¹⁴ C	1,275 x 10 ⁴
²² Na	0,4
a	1 PBq = 10 ¹⁵ Bq

La constant formació de ¹⁴C pels raigs còsmics és una avantatge que es fa servir en la tècnica de datació amb *radiocarboni*. Aquesta tècnica es va desenvolupar a la Universitat de Chicago (W.F.Libby i col·legues, any 1947). Es fa servir per datar materials que continguin carboni orgànic (arqueologia, climatologia, oceanografia). El principi en que es base és que a través de l'activitat metabòlica, l'activitat específica del ¹⁴C en un organisme viu iguala la de l'atmosfera. Però quan un organisme mor, el ¹⁴C decau i no es reemplaça pel ¹⁴C de l'atmosfera. Per tant, a partir del coneixement del període de semi-desintegració del ¹⁴C (5.730 anys) i a partir de la mesura de l'activitat específica del ¹⁴C en el material en qüestió, es pot fer una estimació del temps que ha transcorregut des que l'organisme va morir.

Fonts de radionúclids produïts per l'home

Hi ha algunes activitats realitzades per l'home que contribueixen a augmentar els nivells de radionúclids en l'entorn, be sigui degut a l'alteració de les formacions geològiques on es presenten, o be en forma de residus o de subproductes generats en processos productius. Algunes activitats es tradueixen en l'alliberament de radionúclids naturals cap a l'entorn (per exemple, la mineria de l'urani, la concentració del mineral d'urani i l'enriquiment de l'urani). Altres activitats, com ara la crema de combustibles fòssils, la mineria dels fosfats i la mineria i la trituració de sorres minerals) poden tenir efectes semblants a les de la mineria de l'urani. Hi ha però un grup d'activitats que produeixen radionúclids nous, inexistents a la natura. Entre aquestes darreres activitats hi ha la generació d'electricitat amb reactors nuclears i les proves d'armament nuclear. Totes aquestes s'anomenen fonts antropogèniques de radionúclids.

Radionúclids naturals alliberats per activitats humanes

La mineria de l'urani i la obtenció d'òxid d'urani (U₃O₈), a partir del mineral d'urani, per a la fabricació de combustible nuclear per a reactors i armes atòmiques representen una font important d'alliberament de radionúclids cap a la biosfera.

L'enriquiment de l'urani per fabricar combustible nuclear i bombes atòmiques genera ingents quantitats de l'anomenat urani 'empobrit', avui àmpliament utilitzat pels exèrcits, tant per a recobriment de vehicles blindats, com per recobriment de projectils de diversos calibres.

La mineria dels fosfats i la producció d'àcid fosfòric a partir de les roques fosforiques, que es presenten acompanyades de roques uraníferes, com la fosforita uranífera, són un altra font d'alliberament de radionúclids naturals cap a la biosfera.

La crema de combustibles fòssils pot alliberar també radionúclids a l'entorn.

En tots aquests casos, el problema rau en extreure del subsòl els minerals que contenen urani, amb la qual cosa s'introdueix a la biosfera no solament l'urani i el tori sinó tots els elements de les seves respectives cadenes de desintegració.

La mineria de l'urani i la fabricació de combustible nuclear

L'urani que es troba a la crosta de la Terra, anomenat urani natural, està format bàsicament per tres isòtops diferents: l' ^{238}U , l' ^{235}U i l' ^{234}U . L' ^{238}U , el més abundant, constitueix el 99,284%, l'isòtop ^{235}U , el que és fissionable, constitueix el 0,711% i l'isòtop ^{234}U el 0,0055%.

Dels minerals d'urani que hi ha a la crosta de la terra n'hi ha que tenen lleis elevades (entre 2 i 3 % d' U_3O_8) i altres lleis baixes (<0,4 %). Es considera explotable un mineral d'urani amb un contingut fins i tot d'entre 0,2 % (2.000 ppm) i 0,003 % (30 ppm) d' U_3O_8 , cosa que fa que el mineral s'hagi sotmetre a un procés de concentració (fàbriques de concentrats de mineral d'urani), per obtenir l' U_3O_8 o pastís groc. En les mines d'urani, sobre tot si són a cel obert, en posar-se al descobert el mineral d'urani, comencen a passar a la biosfera els radionuclids que formen la seva cadena de desintegració. En les fàbriques de concentrats d'urani, situades a prop de les mines, es generen (en quantitats ingents) els anomenats 'estèrils' de la mineria d'urani que contenen el 85% de la radioactivitat original del mineral, ja que en ells s'hi poden trobar gairebé tots els productes resultants de la cadena de desintegració de l'urani. Entre ells s'hi troba el ^{226}Ra , que fa que es vagi produint ^{222}Rn , un gas radioactiu, que s'escapa dels residus i va a parar a l'atmosfera. El procés de concentració del mineral d'urani és un procés molt contaminant, tot i que ben desconegut per la opinió pública. Els apilonaments de residus resultants de la mineria d'urani (milions de tones), que contenen els radionúclids de les cadenes de desintegració de ^{238}U i ^{235}U , resten abandonats a molts indrets del món sense cap mena de cura, des d'on passen, per erosió, cap a l'aire i a les aigües, contaminant radioactivament l'entorn i els seus habitants.

L'enriquiment de l'urani per a la fabricació d'urani enriquit

Per obtenir urani que contingui més 0,7 % de l'isòtop ^{235}U , cal sotmetre l' U_3O_8 obtingut a les fàbriques de concentrats, a un procés d'enriquiment, que abans es feia per difusió gasosa, i avui es fa per centrifugació. Com resultat del procés s'obtenen quantitats ingents de residus, anomenats urani 'empobrit', que no són altra cosa que urani amb un contingut d' ^{235}U inferior al de l'urani natural, però amb un contingut d' ^{238}U superior.

Avui, grans quantitats d'aquests residus radioactius s'incorporen en la fabricació de moltes menes d'armament (des de tancs fins a projectils), ja que l'urani és un metall d'una gran duresa i que per impacte entra en ignició. Municions d'aquest tipus s'ha fet servir a la guerra del Golf, als Balcans, a Afganistan i a l'Iraq, contribuint de forma notòria a la introducció de radionúclids a les cadenes tròfiques.

La mineria dels fosfats i la fabricació d'àcid fosfòric i de fosfat bicàlcic.

De les roques que contenen fòsfor que hi ha a la crosta de la Terra, n'hi ha que alhora contenen urani natural. És el cas de les fosforites uraníferes. La roca fosforica típica conté entre 10 ppm (0,01 %) i 300 ppm (0,03 %) d'urani. En el procés de transformació de la roca fosforica en fertilitzants, detergents o en fosfat bicàlcic s'alliberen quantitats ben significatives de radionúclids naturals (l'urani i els seus descendents). Als EUA s'havien explotat les roques fosforiques uraníferes per extreure alhora el fòsfor i l'urani. El Lawrence Livermore Laboratory va demostrar, l'any 1974, que solament recuperant l'urani obtingut com subproducte de l'explotació dels fosfats es podrien cobrir totes les necessitats d'urani de les centrals nuclears nord-americanes. Els residus resultants dels processos d'obtenció de fertilitzants, detergents o fosfat bicàlcic contenen els radionúclids de les cadenes de desintegració de ^{238}U i ^{235}U , inclosos aquests dos elements radioactius. Aquests residus se solen abocar als rius (en alguns indrets s'ha observat augments significatius de ^{210}Po en la fauna aquàtica) o en abocadors (on s'hi ha detectat activitats d' ^{238}U i de ^{230}Th ben considerables). Els fertilitzants a base de fosfats de vegades contenen alguns radionúclids naturals, l' ^{238}U i els seus descendents, poden arribar a tenir-hi activitats de fins a 50 vegades superiors a les dels sòls normals.

La crema de combustibles fòssils

En el carbó que s'extreu de la crosta de la Terra s'hi pot trobar ^{40}K (50 Bq/kg), ^{238}U (20 Bq/kg), ^{232}Th (20 Bq/kg). Hi ha carbons, com els de Xina, que contenen radionúclids naturals amb concentracions més elevades que les citades. El seu alliberament depèn de la temperatura de combustió i dels sistemes de tractament dels gasos que s'emeten per la xemeneia. El Radó també és present en el gas natural, encara que decau la seva activitat en ser emmagatzemat i distribuït per canonada.

Radionúclids antropogènics nous

La curiositat científica per esbrinar l'estructura de l'àtom va menar, a les primeres dècades del segle XX, a la troballa que es podia alliberar energia trencant (fissionant) el nucli de l'urani. De fet, només ^{235}U (un dels tres isòtops que conformen l'urani natural) és fissionable. En canvi quan ^{238}U absorbeix un neutró, no es fissiona pas, sinó que es transforma en ^{239}Pu , un isòtop radioactiu inexistent a la crosta de la Terra, però que és fissionable com ^{235}U . El fenomen de la fissió nuclear, s'indueix a partir del bombardeig amb un neutró d'un nucli d'un element pesant. En la fissió nuclear de l'urani que dona com resultat dos nuclis més petits (anomenats productes de fissió) i entre 2 i 3 neutrons, la massa resultant (incloent els neutrons) és menor que la massa inicial (incloent el neutró). La diferència de masses s'ha transformat en energia ($E=mc^2$).

Avui també sabem que es pot alliberar energia fusionant dos nuclis lleugers (és el fenomen anomenat fusió nuclear). En la fusió nuclear, el nucli resultant també té una massa inferior que els nuclis inicials. La diferència de masses també s'ha transformat en energia. De moment, la única aplicació que s'ha trobat a la fusió nuclear és la bomba atòmica d'hidrogen.

Els productes resultants de la fissió nuclear són isòtops radioactius. La fissió nuclear allibera una gran quantitat d'energia (la fissió completa d'1 kg d' ^{235}U produeix $18,7 \times 10^6$ kWh d'energia).

El fenomen de la fissió nuclear té aplicacions en armament (la bomba atòmica: és una reacció en cadena de fissió sense cap mena de control) i en la generació d'electricitat (els reactors nuclears aprofiten una part de l'energia generada per la reacció en cadena de fissió, de forma més o menys controlada - solament una tercera part de l'energia generada per la fissió es pot aprofitar per generar electricitat en els reactors nuclears).

Els reactors nuclears

El primer reactor nuclear per produir electricitat va ser operatiu a mitjans dels anys 50. A finals de l'any 2002 hi havia al món una potència instal·lada en reactors nuclears de 357 GW. Igualment, per aquesta data, hi havia 32 GW nuclears aturats deguts a la munió de problemes que la tecnologia nuclear ha presentat des dels seus inicis.

En operació normal, els reactors nuclears aboquen residus radioactius a l'entorn (a l'aigua i a l'aire) en forma d'efluents líquids i gasosos. Això es degut a que durant el funcionament dels reactors, es produeixen productes de fissió radioactius en el combustible i productes d'activació, també radioactius, en els materials estructurals i de recobriment., cosa que fa que el refrigerant es contami amb productes de fissió i d'activació, procedents del combustible nuclear, ja que les beines del combustible s'esquerden i els deixen passar. Això fa que de tant en tant, s'hagi de substituir el refrigerant contaminat, havent-se de tractar el refrigerant extret per separar els productes de fissió i d'activació, radioactius ambdós. Normalment, els governs autoritzen administrativament que aquests radionúclids s'aboquin a les aigües i a l'aire. A la Taula 4 es dona una estimació dels abocaments a l'entorn de radionúclids procedents de reactors nuclears en funcionament normal (sense incloure les emissions degudes a accidents nuclears).

Taula 4. Estimació de les emissions totals^a de radionúclids procedents de reactors nuclears (fins el 31 de desembre de 1997)

Radionúclid	Emissions (TBq) ^{b,c}
Gasos nobles	922.400
^3H (atmosfera)	117.622
^{14}C	1.984,8
^{131}I	45,7
Partícules	122,0
^3H (líquid)	150.888
Altres (líquids)	837,9
^a	Emissions en operació normal
^b	1 TBq = 10^{12} Bq
^c	Abocaments fins 1989 segons UNSCEAR (1993)

Dins el nucli dels reactors el combustible nuclear no dura pas eternament (^{235}U es fissiona i es creen productes de fissió que absorbeixen neutrons i inhibeixen la reacció encadena), amb lo qual cal extreure combustible gastat del reactor i posar n'hi de nou (en els reactors BWR i PWR habitualment, una vegada l'any es canvia 1/3 del combustible, que representa substituir una tercera part dels 200 elements de combustible en un reactor de 1.000 MW). Aquest combustible gastat és extraordinàriament radioactiu i, tot i fora del nucli del reactor, continua generant calor. Per refredar-lo es diposita en les piscines de combustible gastat que hi ha en les plantes nuclears. Aleshores, dues coses poden passar: que es reprocessi el combustible o que es disposi definitivament. En el primer cas, per recuperar ^{235}U que encara hi ha en el combustible i el ^{239}Pu que s'hi ha format, es sotmet a un procés anomenat de reprocessament, el qual genera grans quantitats de radionúclids, una part dels quals s'aboquen a l'entorn. A la Taula 5 es dona l'estimació dels abocaments de radionúclids procedents de les plantes de reprocessament.

Taula 5. Estimació dels abocaments^a de radionúclids procedents de les plantes de reprocessament (fins el 31 de desembre de 1997)

Radionúclid	Emissions (TBq) ^b	
	A l'atmosfera	A l'aigua
^3H	10.852	126.012
^{14}C	589	242
^{85}Kr	3.246.000	-
^{90}Sr	-	6.620
^{106}Ru	-	14.800
^{129}I	0,92	14,9
^{131}I	4,9	-
^{137}Cs	4,4	41.903
	^a segons UNSCEAR (2000)	
	^b 1 TBq = 10^{12} Bq	

Les proves nuclears

Una bomba atòmica és un giny pensat per alliberar una enorme quantitat d'energia en un període de temps molt curt. La primera bomba atòmica es va fer explotar de forma totalment secreta a un indret anomenat *La Jornada del Muerto*, al desert d'*Alamogordo* (Nou Mèxic, EUA), el 16 de juliol de 1945. Era una bomba d' ^{235}U . Poc temps després, el 6 d'agost de 1945, el bombarder B-29, batejat amb el nom d'*Enola Gay*, de l'exèrcit del EUA va fer explotar una bomba d' ^{235}U sobre la ciutat d'Hiroshima. Tres dies després una altra bomba atòmica, aquesta de ^{239}Pu , era feta explotar sobre Nagasaki. Cadascuna d'aquestes era equivalent a 20.000 tn de TNT (2,4,6-trinitrotolué).

El desig de desenvolupar bombes atòmiques cada vegada de més potència va menar a la realització de proves nuclears, que entre els anys 1954-1958 i els anys 1961-1962 varen ser realitzades majoritàriament a l'atmosfera, la qual cosa va fer que s'introduïssin i es dispersessin grans quantitats de productes de fissió radioactius a l'atmosfera. S'han documentat unes 2.400 explosions nuclears, de les quals 540 varen ser realitzades a l'atmosfera. Segons l'UNSCEAR, la potència de totes les explosions realitzades a l'atmosfera va ser equivalent a 440 Megatonnes (Mt). De totes les proves realitzades a l'atmosfera, 219 varen ser realitzades per l'URSS, 197 pels EUA, 21 pel Regne Unit i 4 França. Aquestes proves nuclears varen ser prohibides, l'any 1963, pel Tractat de Prohibició de Proves Nuclears a l'atmosfera. Tot i això, entre 1963 i 1980, França i Xina en varen continuar realitzant algunes més (64 en total), ja que es varen negar a signar el Tractat que les prohibia.

Les proves nuclears realitzades a l'atmosfera varen introduir-hi grans quantitats de radionúclids, com ara diversos isòtops del radiocesi, del radiostronci i radioiode, que romanen a l'atmosfera molt temps i que retornen a la Terra molt lluny d'on es van realitzar les detonacions. Les partícules injectades a l'estratosfera produeixen l'anomenat *fall-out* (pluja radioactiva) que es diposita sobre la superfície de la Terra, normalment en el mateix hemisferi on s'ha realitzat

la detonació. Donat que els fluxos d'aire van de l'equador cap als pols, això fa que hi hagi un increment del *fall-out* global cap a les altes latituds.

Les quantitats de radionúclids abocades a l'atmosfera són enormes. Hi ha radionúclids de períodes de semi-desintegració curts (que decauen en pocs dies), però n'hi ha de molt llargs. Les quantitats de radionúclids de períodes de semi-desintegració llargs injectades a l'atmosfera per les proves nuclears realitzades es donen a la Taula 6. Algunes comparacions poden ajudar a tenir una mesura del que va passar: 1) a principis dels anys 60, quan les proves nuclears estaven en el seu punt més àlgid, l'activitat del ^{14}C per unitat de massa de carboni a l'atmosfera es va incrementar fins al doble del ^{14}C cosmogènic, degut al ^{14}C produït per les proves nuclears; 2) la quantitat de ^{137}Cs alliberat a l'atmosfera per les proves nuclears va ser de l'ordre de 20 vegades superior a la quantitat alliberada per l'accident de Txernobil.

Taula 6. Radionúclids produïts i dispersats globalment per les proves nuclears a l'atmosfera (segons UNSCEAR, 2000).^a

Radionúclid	Període de Semi-Desintegració (anys) ^b	Total (EBq) ^c
^3H	12,32	186
^{14}C	5.730	0,21
^{54}Mn	0,86	4,0
^{55}Fe	2,73	1,5
^{89}Sr	0,14	117
^{90}Sr	28,78	0,62
^{91}Y	0,16	120
^{95}Zr	0,18	148
^{103}Ru	0,11	247
^{106}Ru	1,02	12,2
^{125}Sb	2,76	0,741
^{131}I	0,02	675
^{137}Cs	30,07	0,948
^{140}Ba	0,03	759
^{141}Ce	0,09	263
^{144}Ce	0,78	30,7
^{239}Pu	24.110	0,00652
^{240}Pu	6.563	0,00435
^{241}Pu	14,35	0,142
^a	Exclou el <i>fall-out</i> local	
^b	Amb dues xifres decimals	
^c	1 EBq = 10^{18} Bq	

Altres fonts de radioactivitat

Antigament es feia servir el ^{226}Ra per fer luminiscents els dials dels rellotges, Des de 1960 cap avui, aquesta pràctica ha estat abandonada. Avui es fan servir radionúclids emissors beta, com ara el ^3H i el ^{247}Pm , que també s'empren en flotadors per pescar i dials de telèfon.

El radionúclid artificial ^{241}Am es fa servir en alguns tipus de detectors de fum, que donen un nivell d'activitat de l'ordre de 40 Bq per detector.

A la indústria, a la medicina i a la recerca es fan servir radionúclids per a diverses aplicacions.

El ^{14}C , el ^{99}Tc i el ^{131}I s'empren com traçadors en recerca i diagnòsi mèdica. Fonts radioactives de ^{60}Co i de ^{137}Cs es fan servir en radioteràpia. Entre els radionúclids utilitzats en la indústria per mesurar gruixos, inspeccionar soldadures i detectar fuites hi ha el ^{137}Cs i el ^{85}Kr .

Fonts radioactives d'aquests radionúclids es fabriquen en plantes industrials a diferents països. A la Taula 7 es dona una estimació de la producció i les emissions d'aquests radionúclids cap a l'entorn.

Taula 7. Estimació^a de la producció i les emissions de radioisòtops emprats en la medicina, recerca i indústria

Radionúclid	Producció i emissions (PBq) ^b
-------------	--

³ H	0,13
¹⁴ C	0,05
⁸⁵ Kr	0,02
¹²³ I	0,7
¹²⁵ I	0,06
¹³¹ I	0,3
¹³³ Xe	2,6
	^a segons UNSCEAR (1993)
	^b 1 PBq = 10 ¹⁵ Bq

Síntesi realitzada pel Dr. Josep Puig
Tardor 2004
Copyright © 2004, Josep Puig i Boix & GCTPFNN