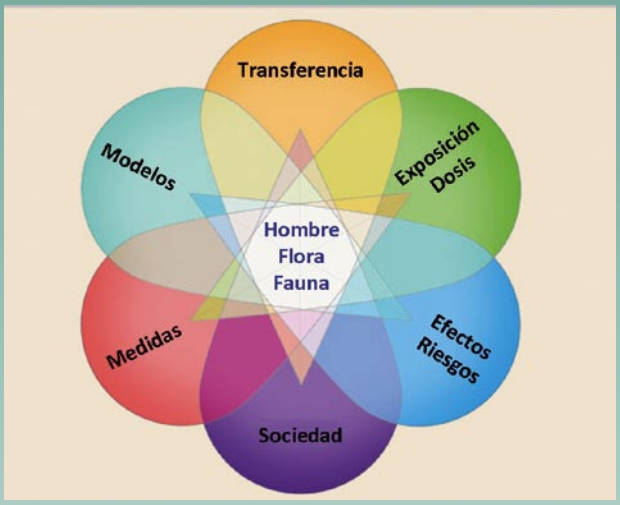
RADIOPROTECCIÓN

REVISTA DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

SEPR

RADIOECOLOGÍA



- ***Entrevista:***
  François Bréchignac
  Presidente de la Unión Internacional de Radioecología (IUR)
- ***Síntesis histórica de las actividades desarrolladas en el Ciemat en el campo de la radioecología***
- ***Las jornadas de calidad en el control de la radiactividad ambiental y su papel en los programas de vigilancia***
- ***Estudios radioecológicos en el Centro Nacional de Aceleradores basados en el uso de la Espectrometría de Masas con Acelerador (AMS)***
- ***Una invitación para contribuir a la agenda estratégica de investigación en radioecología***

Nº 74 • Vol. XX • 2013

Una invitación para contribuir a la agenda estratégica de investigación en radioecología

T.G. Hinton[1], J. Garnier-Laplace[1], H. Vandenhove[2], M. Dowdall[3], C. Adam-Guillermin[1], F. Alonzo[1], C. Barnett[4], K. Beaugelin-Seiller[1], N.A. Beresford[4], C. Bradshaw[5], J. Brown [3], F. Eyrolle[1], L. Fevrier[1], J.C. Gariel[1], R. Gilbin[1], T. Hertel-Aas[6], N. Horemans[2], B.J. Howard[4], T. Ikäheimonen[7], J.C. Mora[8], D. Oughton[6], A. Real[8], B. Salbu[6], M. Simon-Cornu[1], M. Steiner[9], L. Sweeck[2] y J. Vives i Batlle[2]

[1]Instituto Francés de Protección Radiológica y Seguridad Nuclear (IRSN, Francia); [2]Centro de Investigación Nuclear Belga (SCK•CEN, Bélgica); [3]Autoridad de Protección Radiológica Noruega (NRPA, Noruega); [4]Consejo de Investigación en Medio Ambiente Natural (NERC, Reino Unido); [5]Universidad de Estocolmo (SU, Suecia); [6]Universidad Noruega de Ciencias de la Vida (UMB, Noruega); [7]Autoridad de Seguridad Nuclear y Radiación (STUK, Finlandia); [8]Centro de Investigaciones Energéticas Medio Ambientales y Tecnológicas (CIEMAT, España); [9]Oficina Federal Alemana de Protección Radiológica (BfS, Alemania).

Traducción del artículo "*An invitation to contribute to a strategic research agenda in radioecology*" publicado en el J. Environm. Radioact. 115:73-82 (2013), realizada con permiso de la revista por Almudena Real (Ciemat).

RESUMEN

Recientemente ocho organizaciones europeas han creado una Alianza Europea de Radioecología con la intención de integrar parte de sus respectivos esfuerzos en investigación en un programa transnacional y así mejorar la radioecología (www.er-alliance.org). La Alianza es una asociación abierta a otras organizaciones del mundo interesadas en promover la radioecología. Los miembros de la Alianza reconocen que su investigación en radioecología mejoraría si se aunaran eficazmente los recursos de sus organizaciones y se priorizaran sus esfuerzos hacia temas comunes de interés mutuo. Un paso importante en este proceso de establecer prioridades fue el desarrollo de la Agenda Estratégica de Investigación (SRA). La Red de Excelencia en Radioecología financiada por la CE, denominada STAR (Strategy for Allied Radioecology), se creó, en parte, para desarrollar la SRA. Este artículo es el primer borrador de la SRA publicado. La SRA propone las prioridades en temas de investigación en Radioecología, con objeto de mejorar la eficacia investigadora y avanzar más rápidamente en esta ciencia. Responde a la pregunta "¿Que temas, si se abordaran de manera crítica en los próximos 20 años, producirían un avance significativo en radioecología?". Los tres retos científicos presentados en la SRA, y sus 15 líneas de investigación asociadas, son una visión estratégica de lo que la radioecología puede lograr en el futuro. Enfrentarse a estos retos requerirá un esfuerzo dirigido y una colaboración con numerosas organizaciones de todo el mundo. Hacer frente a estos retos es importante para el avance de la radioecología y para proporcionar conocimientos científicos a los que toman las decisiones. Aunque el desarrollo del borrador de la SRA ha sido en gran medida un esfuerzo europeo, la expectativa es que inicie un dialogo abierto con la comunidad de radioecología internacional y los grupos interesados. Este artículo es un resumen de la SRA, con el objetivo de presentarla a la comunidad científica y de invitar a que se envíen contribuciones por parte de los grupos interesados. Las críticas y sugerencias dirigidas a mejorar la SRA son bienvenidas y pueden remitirse a través de la página de STAR (www.star-radioecology.org).

ABSTRACT

With intentions of integrating a portion of their respective research efforts into a trans-national programme that will enhance radioecology, eight European organisations recently formed the European Radioecology ALLIANCE (www.er-alliance.org). The ALLIANCE is an Association open to other organisations throughout the world with similar interests in promoting radioecology. The ALLIANCE members recognised that their shared radioecological research could be enhanced by efficiently pooling resources among its partner organizations and prioritising group efforts along common themes of mutual interest. A major step in this prioritisation process

was to develop a Strategic Research Agenda (SRA). An EC funded Network of Excellence in Radioecology, called STAR (Strategy for Allied Radioecology), was formed, in part, to develop the SRA. This document is the first published draft of the SRA. The SRA outlines a suggested prioritisation of research topics in radioecology, with the goal of improving research efficiency and more rapidly advancing the science. It responds to the question: "What topics, if critically addressed over the next 20 years, would significantly advance radioecology?" The three Scientific Challenges presented within the SRA, with their 15 associated research lines, are a strategic vision of what radioecology can achieve in the future. Meeting these challenges will require a directed effort and collaboration with many organisations the world over. Addressing these challenges is important to the advancement of radioecology and in providing scientific knowledge to decision makers. Although the development of the draft SRA has largely been a European effort, the hope is that it will initiate an open dialogue within the international radioecology community and its stakeholders. This is an abbreviated document with the intention of introducing the SRA and inviting contributions from interested stakeholders. Critique and input for improving the SRA are welcomed via a link on the STAR website (www.star-radioecology.org).

INTRODUCCIÓN

La radioecología es una rama de las ciencias medioambientales interesada en los radionucleidos como contaminantes y en la radiación como factor de estrés. Los estudios radioecológicos constituyen la base para estimar exposiciones, dosis y consecuencias de la contaminación radiactiva en el medioambiente, incluyendo los riesgos para el hombre. El estudio de la radiactividad ambiental incluye aspectos comunes a otros grupos de contaminantes (transporte medioambiental, destino y efectos en humanos y biota no humana), así como aspectos específicos de los radionucleidos (términos fuente especializados, rutas de irradiación externa, dosimetría de radiaciones, decaimiento radiactivo y aspectos únicos de medida). La experiencia en radioecología es necesaria siempre que haya un motivo de preocupación por la radiación presente en el medioambiente y se requiera una evaluación de los riesgos potenciales. Por ejemplo, la radioecología es importante cuando se evalúan los riesgos derivados del ciclo de combustible nuclear, incluyendo el almacenamiento de residuos nucleares; en el debate de los efectos de exposiciones crónicas a niveles bajos; y en respuesta a emergencias en las que están implicados materiales radiactivos, tales como accidentes nucleares o actos terroristas.

Para hacer frente a cuestiones emergentes en radioecología en Europa, ocho organizaciones[1] firmaron en 2009 un Memorando de Entendimiento para crear la Alianza Europea de Radioecología[2] (la Alianza). La Alianza es una asociación abierta a otras organizaciones del mundo que tengan intereses similares de promover la radioecología. El Memorando manifiesta las intenciones de los miembros de la Alianza de integrar parte de sus respectivos esfuerzos de investigación en un programa transnacional que mejorará la radioecología. Los miembros de la Alianza reconocen que su investigación compartida en radioecología puede verse fortalecida si se ponen en común de manera eficaz los recursos entre sus organizaciones asociadas, y dando prioridad a los esfuerzos del grupo hacia temas comunes de interés mutuo. Un paso importante en este proceso de establecer prioridades era desarrollar una Agenda Estratégica de Investigación (SRA, del inglés *Strategic Research Agenda*). La red de excelencia en radioecología financiada por la CE denominada STAR (*Strategy for Allied Radioecology*[3]) se creó para, entre otras tareas, desarrollar la SRA.

Este manuscrito es el primer borrador de la SRA publicado en una revista científica[4]. Es una propuesta de las prioridades en los temas de investigación en radioecología, con el objetivo de mejorar la eficacia investigadora y de avanzar más rápidamente en la ciencia. La SRA responde a la cuestión: ¿Qué temas, si se abordaran en profundidad durante los próximos 20 años, producirían un avance significativo en radioecología?

Los tres retos científicos de la SRA y sus 15 líneas de investigación asociadas son una visión estratégica de lo que la radioecología puede lograr en el futuro a través de un esfuerzo dirigido y la colaboración de muchas organizaciones. Se trata de una visión en la que se pidió a los participantes pensar de manera creativa y sin límites, cómo imaginaban los resultados que podrían conformar el futuro

[1] *Instituto Francés de Protección Radiológica y Seguridad Nuclear (IRSN, Francia); Autoridad de Seguridad Nuclear y Radiación (STUK, Finlandia); Centro de Investigación Nuclear Belga (SCK•CEN, Bélgica); Consejo de Investigación en Medio Ambiente Natural (NERC, Reino Unido); Centro de Investigaciones Energéticas Medio Ambientales y Tecnológicas (CIEMAT, España); Oficina Federal Alemana de Protección Radiológica (BfS, Alemania); Autoridad Sueca de Seguridad Radiológica (SSM, Suecia); Autoridad de Protección Radiológica Noruega (NRPA, Noruega).*

[2] *www.er-alliance.org*

[3] *www.star-radioecology.org*

[4] *Esta frase hace mención al trabajo original publicado en el Journal of Environmental Radioactivity, cuya traducción se presenta en este artículo de RADIOPROTECCIÓN.*

de la radioecología y beneficiar a los grupos interesados. La realidad es que la SRA requerirá una cantidad considerable de recursos y de tiempo para llevarla a buen término. El "cómo", los recursos y la factibilidad de lograr los temas de investigación presentados en la SRA, se desarrollarán en un documento posterior que perfilará la "hoja de ruta" requerida para lograr esta visión. La hoja de ruta unirá la SRA con la evolución de la ciencia, proporcionando los planes de acción necesarios, la asignación de recursos e hitos requeridos para llevar a cabo la SRA. La hoja de ruta será una versión más extensa de la SRA y está previsto que esté disponible en enero de 2014.

A pesar de que el desarrollo de la SRA ha sido en gran medida un esfuerzo europeo, la expectativa es que inicie un dialogo abierto en la comunidad internacional de radioecología. STAR está buscando la opinión de:

- La comunidad científica de radioecología mundial;
- La industria;
- El Consejo Asesor Externo de STAR;
- Las organizaciones internacionales [por ejemplo, la Organización Mundial de la Salud (OMS); el Comité Científico de las Naciones Unidad sobre los Efectos de la Radiación Atómica (UNSCEAR), la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), el Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA)];
- La Unión Internacional de Radioecología (IUR);
- Otras Plataformas pan-europeas sobre temas de investigación que requieren de la radioecología [MELODI (*Multidisciplinary European Low Dose Initiative*), NERIS (*European Platform on Preparedness for Nuclear and Radiological Emergency Response and Recovery*); IGD-TP (*Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform*)];
- Otras redes de radioecología en el mundo [por ejemplo, NCoRE (*National Center for Radioecology*), en los Estados Unidos de América]; y
- Los grupos interesados.

Este es un artículo que resume la SRA con la intención de presentarla y de invitar a que los grupos interesados contribuyan. Las críticas constructivas y sugerencias para mejorar la SRA son bienvenidas, pudiendo realizarse a través de la página electrónica de STAR (www.star-radioecology.org).

¿Cómo se ha desarrollado la Agenda Estratégica de Investigación?

La SRA se destiló de los intereses de STAR y de las organizaciones que son miembro de la Alianza. Se realizaron diversas evaluaciones sobre el estado de la radioecología, incluyendo las aportaciones de los grupos interesados [1] y de la Unión Internacional de Radioecología (www.iur-uir.org/en/); también se evaluó la información sobre las necesidades en investigación, ausencia de datos y recomendaciones para el futuro de la radioecología, o de su ciencia aliada, la ecotoxicología [2-17].

Adicionalmente, la SRA se formuló considerando diversos aspectos relacionados con:

- *Cambios recientes en el alcance:* ahora se reconoce que las ciencias radioecológicas deben ser capaces de demostrar de manera explícita la protección del medioambiente, en lugar de hacerlo de manera implícita mediante la protección de la personas [18-20]. Por ejemplo, el informe de la OCDE/NEA [11] "Temas científicos y desafíos emergentes para la protección radiológica", manifiesta específicamente que: "El sistema actual de protección radiológica, no habiendo sido diseñado para este propósito, es una herramienta débil para demostrar el nivel de protección radiológica proporcionado al medioambiente".
- *Nuevos paradigmas y avances científicos:* los cambios recientes relevantes para los efectos de la radiación en humanos, también son relevantes para radioecología, y van más allá del dogma previo de la teoría del blanco único para supervivencia celular, como único modo por el que puede tener lugar la muerte celular. Se están incorporando nuevas ideas a la ciencia, tales como los efectos vecindad, la epigenética, la inestabilidad genómica y las consecuencias a nivel de población de exposiciones durante múltiples generaciones. Adicionalmente, la radioecología del futuro necesitará aprovecharse de los rápidos avances en las ciencias de la proteómica y la genómica para ayudar a desarrollar explicaciones mecanísticas y biomarcadores de alerta tempranos.
- *Mejorar la credibilidad con los grupos interesados:* las incertidumbres y la falta de poder predictivo de las evaluaciones de riesgo son las principales causas de la reducida credibilidad que tiene el público en las ciencias radioecológicas. La credibilidad en los modelos de evaluación es de particular importancia ya que sus predicciones son con frecuencia constituyentes clave en la toma de decisiones en respuesta a una emergencia, la gestión de residuos, la remediación medioambiental y en litigios [2]. A menudo, la mayoría de estas incertidumbres se originan a partir de un conocimiento inadecuado del comportamiento medioambiental de los radionucleidos [21]. La adquisición de nuevos conocimientos científicos a través de la investigación en radioecología es por tanto un elemento crucial para mejorar las evaluaciones de riesgos para humanos y

biota no-humana, y de ese modo mejorar la credibilidad frente a los grupos interesados.

- *Deficiencias científicas:* los contaminantes no aparecen de forma aislada, como han mostrado históricamente los protocolos experimentales, sino que ocurren como bajas concentraciones de mezclas complejas. Así, son necesarios cambios en nuestras aproximaciones experimentales para abordar el importante tema de si la protección radiológica necesita ser considerada en el contexto de escenarios con múltiples contaminantes.
- *Necesidades de integración:* el éxito de la radioecología en el futuro, definido de manera global como lograr cubrir las necesidades de los grupos interesados, requerirá la integración mediante la adopción de una aproximación del ecosistema más holística y la integración de los servicios ecológicos y las evaluaciones de riesgo medioambiental; integrar los sistemas de ayuda a la decisión y utilizar análisis multi-criterio en la toma de decisiones para mejorar la gestión post-accidente; e integrar la información radioecológica con datos de otras disciplinas científicas para optimizar las opciones de gestión.
- *Futuros riesgos potenciales:* los accidentes en Three Mile Island, Chernobyl y Fukushima han mostrado que los errores humanos pueden anular los dispositivos de seguridad; que las consecuencias pueden ser más serias de lo esperado; y que acontecimientos con una probabilidad extremadamente baja de que ocurran pueden suceder. Acontecimientos futuros pueden conllevar la liberación al medioambiente de radionucleidos diferentes de aquellos para los que en la actualidad tenemos más conocimiento. Además, los ataques terroristas en las últimas décadas han demostrado que los grupos terroristas tienen tanto la intención como la capacidad para atacar áreas urbanas. Así, acciones tales como un ataque a instalaciones nucleares, o el uso de bombas sucias que contengan radionucleidos más exóticos que el cesio pueden representar desafíos futuros para la radioecología.
- *Primeras lecciones de Fukushima:* desde el accidente de Chernobyl, se han realizado importantes avances en la modelización de las liberaciones atmosféricas, tal y como se hizo evidente por lo bien que los modelos actuales predijeron el transporte a gran distancia y la dinámica de la pluma desde Fukushima. Sin embargo, los modelos atmosféricos de campo cercano y el modelo terrestre de transferencia basado en el equilibrio, no predijeron la variación significativa y la rápida dinámica de intercepción, translocación y movilidad del cesio depositado que ocurrió en Fukushima. Además, existe una considerable incertidumbre en cuanto a cuáles son los impactos marinos y los periodos de recuperación en los ambientes cercanos a la costa. Las transferencias de radionucleidos en los bosques contaminados, la erosión de los suelos contaminados y los problemas técnico/sociales de eliminar grandes cantidades de materiales destruidos por el tsunami y que ahora están contaminados con radionucleidos, siguen siendo problemas sin resolver. Estos ejemplos enfatizan de nuevo la necesidad de mejorar los modelos de transferencia y de exposición a partir de un entendimiento más profundo de los procesos medioambientales.

Basándose en la consideración de los temas arriba mencionados, la SRA da prioridad a tres grandes retos científicos a los que se enfrenta la radioecología. Cada uno de estos retos científicos se desarrolla como una sección separada de la SRA e incluye una declaración de la visión de lo que debe llevarse a cabo en los próximos 20 años en esa área de la radioecología, además de ofrecer un programa de líneas de investigación principales, consideradas necesarias para llevar a cabo la visión. Hacer frente a estos retos es importante para el futuro de la radioecología y para proporcionar conocimientos científicos adecuados a los que toman las decisiones y al público.

TRES RETOS CIENTÍFICOS EN RADIOECOLOGÍA

Reto 1: predecir de una manera más robusta la exposición de humanos y especies no-humanas, mediante la cuantificación de procesos clave que influyen en la transferencia de radionucleidos, e incorporando el conocimiento en nuevos modelos dinámicos

Uno de los objetivos fundamentales de la radioecología es predecir las transferencias medioambientales de los radionucleidos y la exposición resultante en el hombre y la biota no humana. El problema es que los procesos clave que rigen el comportamiento de los radionucleidos no siempre se entienden bien, lo que lleva a modelos que representan de manera incompleta (o incluso errónea) estos procesos. El reto al que se enfrentan los radioecólogos es identificar los procesos clave, mejorar la comprensión de ellos e incorporarlos en los modelos, de tal manera que estos últimos predigan de forma más realista el comportamiento de los radionucleidos. Haciendo modelos que estén más basados en los procesos, esperamos: (a) una reducción significativa en las incertidumbres del modelo, (b) una mejor cuantificación de la variabilidad medioambiental, (c) identificar los parámetros que tienen más influencia, y (d) desarrollar herramientas de

modelización mejoradas, capaces de predecir la exposición a radionucleidos de humanos y biota no-humana bajo una variedad de condiciones, lo que mejorará las evaluaciones de exposición a radiación para humanos, flora y fauna.

Por lo tanto, nuestra Visión Estratégica para la investigación sobre factores de transferencia y exposiciones es que durante los próximos 20 años la radioecología habrá logrado una profunda conceptualización mecanística de los procesos de transferencia de radionucleidos en los principales ecosistemas (terrestre, acuático, urbano) y será capaz de predecir con precisión la exposición de humanos y biota no-humana, incorporando una comprensión más profunda de los procesos ambientales.

Será necesario abordar cuatro líneas de investigación para lograr esta visión.

Identificar y representar matemáticamente los procesos clave que contribuyen significativamente a la transferencia ambiental de radionucleidos y a la exposición resultante de humanos y biota no-humana

Un reto para los radioecólogos durante las próximas dos décadas es llegar a comprender suficientemente los procesos de transferencia ambiental y de exposición, de tal manera que se puedan explicar las observaciones realizadas y puedan hacerse predicciones precisas. Actualmente, los modelos radiológicos de evaluación están dominados por las relaciones empíricas [22, 23] y son herramientas pragmáticas ya que han facilitado la modelización de la transferencia de radionucleidos y las predicciones de exposición resultantes en humanos y biota no-humana. Sin embargo, su uso aumenta significativamente la incertidumbre de las predicciones hechas con el modelo. El uso de relaciones empíricas simples para representar la transferencia entre los compartimentos medioambientales, significa que se agregan muchos procesos físicos, químicos y biológicos en un parámetro, lo que es una debilidad implícita de la aproximación cuando se requiere una comprensión detallada de los procesos y de las dinámicas del sistema.

El desarrollo de modelos basados en los procesos, menos dependientes de las relaciones empíricas, inevitablemente reducirá la incertidumbre asociada a la modelización de la transferencia de radionucleidos en el medioambiente. Los diferentes parámetros de los modelos empíricos deberían sustituirse por ecuaciones matemáticas que describan los procesos físicos, químicos y biológicos clave que rigen la transferencia de radionucleidos. Deben incorporarse propiedades específicas de los radionucleidos y componentes bióticos y abióticos de cada medioambiente. El resultado sería más realista, con modelos más precisos para la evaluación del impacto radiológico, aumentando la confianza en el proceso de evaluación cuando se apliquen estos modelos.

Uno de los principales aspectos de este reto será identificar donde se puede obtener la mayor ventaja en (a) reducir incertidumbres y entender la variabilidad, (b) justificar la investigación adicional necesaria para poder parametrizar modelos mecanísticos dinámicos, e (c) identificar el nivel de complejidad del modelo necesario para escenarios de exposición específicos.

Adquirir los datos necesarios para parametrizar los procesos clave que controlan la transferencia de radionucleidos

Obtener los datos para la parametrización del modelo requerirá realizar investigación de laboratorio y estudios de campo, así como revisiones de la información publicada por la comunidad científica. La escasez de datos es una de las principales fuentes de incertidumbre incluso para el modelo de equilibrio más simple. Recientemente el OIEA ha recopilado los valores de los parámetros para la estimación de la transferencia de radionucleidos, lo que ha permitido identificar las principales deficiencias existentes en los datos [23]. Para numerosos elementos, sólo se dispone de los factores de transferencia suelo-planta para el 10% de las combinaciones planta-suelo posibles. La escasez de datos aumenta con los niveles tróficos y las fases de la cadena alimentaria humana. Para aproximadamente el 50% de las combinaciones necesarias radionucleido-producto animal, no existen datos sobre los coeficientes de transferencia [23].

También hay una necesidad de considerar aproximaciones alternativas para hacer frente a este problema. La amplia gama de radionucleidos, de alimentos para el consumo humano y (especialmente) de especies de animales y plantas significa que, pragmáticamente, puede que nunca estemos en posición de tener datos empíricos de todos ellos. Se han sugerido algunas aproximaciones para extrapolar los datos entre especies, tales como las relaciones filogenéticas (es decir, usar "ancestros comunes" para categorizar la transferencia) o alométricas (dependiente de masa), así como la extrapolación a través de la tabla periódica usando análogos químicos. Otras aproximaciones, tales como la estadística bayesiana, permiten utilizar un número reducido de observaciones empíricas, apoyándose en inferencias realizadas desde una base de datos más completa y comprensible.

Desarrollar modelos de transferencia y exposición que incorporen interacciones físicas, químicas y biológicas, y permitan hacer predicciones espacial y temporalmente

Los modelos de transferencia desarrollados deben ser capaces de integrar contaminantes radiactivos en las dinámicas generales de los sistemas ecológicos. Un ejemplo de ello es utilizar modelos de transporte suelo-vegetación-atmósfera acoplados al contaminante (SVAT del inglés *Soil-Vegetation-Atmosphere Transport*) para investigar los patrones más amplios de circulación a largo plazo de sustancias en la interfase geosfera-biosfera. Otro ejemplo es la unión de la dispersión costera de corto alcance con las dinámicas de movimiento de largo alcance del agua y el sedimen, o para identificar el destino de los radionucleidos en el medioambiente marino, como parte de los patrones de circulación oceánica global inducidos por el clima. Además, hay que considerar a los impulsores del cambio global, tales como la variación climática y la evolución de los cambios hidrológicos y el uso de la tierra, ya que éstos influirán el transporte, el destino y los efectos de los radionucleidos en el medioambiente. Otros ejemplos en los que debe mejorarse nuestra comprensión de los procesos son el comportamiento de los radionucleidos en interfase (por ejemplo atmósfera-superficie del agua, tierra-costa, cuencas-cursos de agua dulce, salino-agua dulce, geosfera-biosfera, óxico-anóxico) y la influencia de co-contaminantes en el comportamiento de los radionucleidos.

Los modelos de exposición de flora y fauna y su dosimetría también necesitan avances importantes. Se necesitan mejoras para reducir las incertidumbres dominantes en la dosimetría de la biota no-humana, mediante la incorporación de aspectos espaciales y temporales de los animales dentro del medioambiente contaminado y considerar como las características del ciclo vital de las especies alteran el potencial de exposición y de la dosis resultante. Durante diversas etapas de la vida, los procesos dinámicos pueden cambiar muchas características de un organismo, como el peso, la ingesta de alimentos, el metabolismo y la concentración interna del contaminante. Además, las fuentes de alimentos y el hábitat también variarán. Estos cambios influyen en la cantidad de contaminante incorporado y/o en los niveles de irradiación externa. Modelizando la exposición de manera dinámica y mecanística, estos cambios pueden ser tenidos en cuenta. Mediante la introducción de modelos de heterogeneidad espacial será posible tener en cuenta los movimientos del organismo (por ejemplo, estrategias de forrajeo, migración, creación de madrigueras o nidos, en función de las etapas del ciclo vital). La movilidad de un organismo en un área contaminada de forma heterogénea contribuirá significativamente a la variación en la exposición observada entre individuos.

La radioecología está particularmente subdesarrollada en el análisis de las interacciones de sustancias con los seres vivos a nivel de la membrana, así como en la consideración de la biocinética de sustancias incorporadas al organismo que conduce a su distribución, asimilación y eliminación dependiente del tiempo. Una expectativa es que sea posible combinar los procesos de circulación, metabolismo y eliminación con la toxicocinética y por consiguiente comprender los efectos de los contaminantes radioactivos que siguen las mismas rutas de distribución que sus homólogos no radiactivos.

Representar la transferencia de radionucleidos y la exposición a nivel de escenario o de medioambiente global, con una indicación de la incertidumbre asociada

Esta línea de investigación es necesaria para diseñar e implementar una interfaz, fácil de utilizar, del GIS (*Geographic Information System*) con los modelos dinámicos de nuevo desarrollo. Una interfase con el GIS facilitará el mapeo de la transferencia y exposición de radionucleidos a nivel de escenario y ayudará a identificar áreas medioambientales radiosensibles. Una interfase GIS puede incluir valores de referencia (valores de fondo geoquímicos o antropogénicos) y por tanto proporcionar un medio útil para evaluar el nivel de exposición. También podrían incorporarse y visualizarse los cambios en las condiciones de exposición sufridas por los animales, ya que atraviesan y utilizan diferentes hábitats con contaminación heterogénea, para mejorar nuestra comprensión de las condiciones de exposición y, como resultado, reducir las incertidumbres en las evaluaciones medioambientales. Se pueden vincular los mapas temáticos de diferentes variables terrestres, tales como el uso del suelo, tipo de suelo, índice de área foliar y coeficiente de cultivo, clima local, etc., a los datos del transporte de radionucleidos. Dicho sistema permitirá predicciones de exposición ambiental sólidas a distintas escalas, permitiendo una visualización avanzada de las complejas interacciones entre los radionucleidos y las distintas propiedades y procesos medioambientales. El sistema también facilitaría la comunicación con los grupos interesados.

En la Figura 1 se representan aspectos claves del Reto 1.

Reto 2: determinar las consecuencias ecológicas en las condiciones realistas en las que los organismos están expuestos

Durante los últimos 15 años, los esfuerzos internacionales se han centrado en nuevas estrategias para proteger el

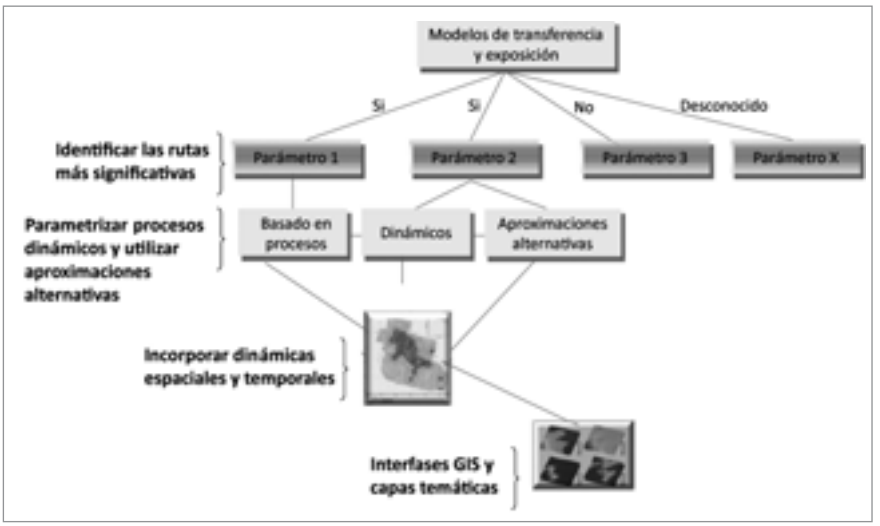


Figura 1. Esquema de aspectos clave del Reto 1: Predecir la exposición de humanos, flora y fauna de una manera más sólida mediante la cuantificación de procesos clave que influyen la transferencia de radionucleidos, e incorporando el conocimiento en nuevos modelos dinámicos.

medioambiente de las sustancias radiactivas. Por ejemplo, en Europa se ha realizado un trabajo considerable para recopilar información relevante de los efectos de las radiaciones ionizantes en especies no-humanas, recogida en la base de datos FREDERICA [24] y produciendo valores de cribado ecológicos, necesarios para implementar una aproximación en etapas de evaluación de riesgo ecológico (ERA, del ingles *Ecological Risk Assessment*) (FASSET [25], ERICA [13], PROTECT [26]). Si bien la aproximación de tipo ERA supone un avance sustancial en radioecología, el no disponer de suficientes datos impide que los actuales análisis ERA rindan cuentas de las condiciones ambientales realistas a las que los organismos están expuestos. Por ejemplo, los datos siguen siendo insuficientes para tener en cuenta los efectos de dosis bajas, regimenes de tasa de dosis variable, escenarios con múltiples contaminantes, variación en la sensibilidad de las especies a la radiación debidas a rasgos del ciclo vital o efectos a nivel de ecosistema. Esta falta de conocimientos se solventa mediante extrapolaciones y el uso de factores de evaluación (o factores de seguridad) que añaden conservadurismo y aumentan las incertidumbres en las evaluaciones de riesgo.

Están surgiendo nuevas aproximaciones para comprender y evaluar los efectos de la radiación en especies no humanas; fundamentalmente debido a las similitudes que tiene la radioecología con la ecotoxicología de las sustancias químicas, la ecología de factores de estrés [27] y la radiobiología de humanos. Las aproximaciones enfatizan que para determinar de forma adecuada los efectos de cualquier contaminante debemos abordar las condiciones ambientales realistas en las que los organismos están realmente expuestos. Debemos relacionar la exposición con los efectos bajo condiciones realistas que incorporen factores abióticos naturales (por ejemplo cambio climático, temperatura, inundaciones, nieve o hielo) y factores bióticos (por ejemplo, estado fisiológico y del ciclo vital del organismo, procesos ecológicos como competición, prelación y efectos indirectos).

En consecuencia, nuestra Visión Estratégica para la investigación de los efectos medioambientales, es que durante los próximos 20 años la radioecología habrá adquirido un profundo conocimiento mecanístico de los procesos por los que la radiación produce efectos a distintos niveles de organización biológica, incluyendo las consecuencias en la integridad del ecosistema, y será capaz de predecir con precisión los efectos que se producirán bajo las condiciones realistas en las que los organismos están expuestos.

Será necesario abordar cinco líneas de investigación para alcanzar esta visión.

Entender mecanísticamente los procesos que relacionan los efectos producidos por la radiación en especies no humanas, desde el nivel molecular al nivel de individuo de complejidad biológica

Esta línea de investigación debe identificar características moleculares/celulares y del individuo clave, que dirijan los efectos inducidos por la radiación a nivel de individuo. El uso de métodos analíticos avanzados de biología molecular es una aplicación pionera en radioecología (por ejemplo, [28]) y cuando éste se suma a la aproximación de biología de sistemas [29], representa una gran promesa para mejorar nuestra comprensión de los mecanismos implicados en las respuestas inducidas por radiación a los niveles subcelulares y sus consecuencias para los individuos. Se implementarán diversas aproximaciones, tales como "-omics" y biomarcadores específicos de sistema. Además, se desarrollarán modelos Biocinéticos/DEB (*Dynamic Energy Budget*) acoplados, para comprender como funciona el metabolismo a nivel de individuo tras una irradiación. La teoría DEB [30] ofrece un marco sencillo y consistente para entender los efectos de los contaminantes sobre el crecimiento, la reproducción y la supervivencia de una manera integrada.

Entender que causa las diferencias en radiosensibilidad intra- e inter-especies (ej. entre tipos celulares, tejidos, estadios del desarrollo, ciclos vitales, características ecológicas)

Esta línea de investigación debe poner en relieve las principales causas de las diferencias de radiosensibilidad existentes entre diversas especies y dentro de una misma especie. A pesar de que los mecanismos fundamentales por los que la radiación produce daños parecen ser universales, las respuestas individuales a la exposición varían tremendamente, dependiendo de factores como el tipo de radiación (variación de hasta un factor 50), exposición aguda frente a crónica (variación de uno o dos órdenes de magnitud), tipo celular, tipo de efecto, estado del desarrollo, especie (variación de hasta 6 órdenes de magnitud), y nivel de organización biológica [31]. Algunos de los parámetros generales que se sabe que determinan la sensibilidad de un organismo a radiación son: el contenido de ADN en la célula (volumen cromosómico medio); la eficacia y tipos de mecanismos de reparación del ADN; la capacidad de repoblación celular; y la capacidad de los tejidos y los órganos de regenerarse (revisión en [32]). Más recientemente, *Fuma y colaboradores* han combinado la masa del ADN nuclear y la distribución de sensibilidad de las especies para derivar dosis peligrosas para anfibios expuestos de forma aguda a radiación y para establecer valores de referencia para los efectos radioinducidos [33]. Una combinación de los conceptos de filogenia y homología, tal y como existe en toxicología comparativa, podría apoyar a la extrapolación entre especies de los efectos producidos por exposición a radiación.

Entender las interacciones entre los efectos producidos por las radiaciones ionizantes y otros co-contaminantes

Es necesario realizar investigaciones para comprender los efectos de la radiación en el contexto de mezclas de contaminantes y múltiples factores de estrés. La exposición a múltiples factores de estrés puede modular, directa o indirectamente, los efectos de la radiación. Los múltiples factores de estrés proporcionan un ejemplo de la disparidad entre los protocolos experimentales para estudiar los efectos biológicos y la realidad de las condiciones de exposición. El medioambiente está contaminado con bajas concentraciones de mezclas complejas (ej. radionucleidos, metales, pesticidas, disruptores endocrinos). La exposición a múltiples contaminantes es la regla, no la excepción [34]. El estudio de un contaminante aislado es necesario y proporciona información crítica sobre el mecanismo subyacente que resulta en efectos detectables. Sin embargo, el peligro y la falta de realismo al estudiar los contaminantes aislados, es que no se puede predecir las posibles interacciones entre los muchos factores de estrés a los que los organismos están expuestos. Las interacciones pueden producir efectos protectores y reducir el daño total, o aumentar los efectos de manera sinérgica. La investigación sobre las potenciales interacciones entre los factores de estrés debe basarse en sus modos de acción y sus dianas celulares a nivel molecular (ej. estrés oxidativo, genotoxicidad).

Entender los mecanismos implicados en las respuestas multi-generacionales a exposiciones ecológicamente relevantes a largo plazo (ej. efectos maternos, efectos heredables, respuesta adaptativa, inestabilidad genómica y procesos epigenéticos)

Se necesita una estrecha conexión con la ecología evolutiva para estudiar las respuestas adaptativas y la modulación de los efectos tras exposición a radiación de múltiples generaciones. Es crucial comprender los efectos a largo plazo de la radiación sobre las características fenotípicas y genéticas de las poblaciones para evaluar los riesgos de una degradación de la población y sus consecuencias para el mantenimiento tanto de la biodiversidad genética como de la biodiversidad de especies.

Entender como los efectos de la radiación se combinan en un contexto ecológico más amplio a niveles superiores de organización biológica (dinámica de poblaciones, interacciones tróficas, efectos indirectos a nivel de comunidad y consecuencias para el funcionamiento del ecosistema)

Es probable que comprender y considerar las diferencias en los rasgos del ciclo vital entre especies reduzca las incertidumbres actuales en la predicción de los efectos de la radiación en una población de animales o plantas. Además, el desarrollo de modelos de poblaciones y de ecosistemas capaces de integrar los efectos de la radiación con la dinámica de poblaciones supondrá un avance sustancial en el tema. Es esencial evaluar las consecuencias de las sustancias radiactivas en la integridad ecológica (es decir, estructura, composición y función) para optimizar la gestión de los recursos del ecosistema (agua, bosque, agricultura), así como otros vienes naturales y servicios proporcionados a la sociedad.

Nuestro conocimiento de los efectos de la radiación (y protección radiológica) está basado casi enteramente en experimentos con especies individuales, mientras que en la realidad las especies están expuestas como parte de un conjunto de múltiples especies. En el medio silvestre, las especies que

se encuentran en el mismo medioambiente son expuestas de manera diferente a la radiactividad debido a su hábitat, comportamiento y régimen de alimentación específicos. Las especies también tienen diferente sensibilidad a la radiación. En un ecosistema, esto significa que las diferentes respuestas de las especies a la radiación también alterarán las interacciones entre especies y pueden afectar cosas tales como la competencia o las interacciones depredador-presa o parásito-hospedador. Esto llevará a efectos secundarios que cambiarán la estructura, composición y función de la comunidad. Estos efectos secundarios indirectos pueden tener un impacto en la población mayor que los efectos directos de la radiación. Estas cuestiones han sido poco estudiadas en radioecología, y para el caso en ecotoxicología, debido en parte a la complejidad de estudiar múltiples especies en conjunto en el laboratorio o desentrañar la complejidad en estudios de campo. Sin embargo, una serie de experimentos utilizando microcosmos ha demostrado claramente tales efectos indirectos (ej. [35, 36]), y algunos estudios de campo realizados en Chernobyl también apuntan en esa dirección [37].

La propagación de los efectos desde los individuos a las poblaciones depende de las características específicas del ciclo vital individual. Independientemente del factor de estrés o del tipo de contaminante, la gran mayoría de los datos ecotoxicológicos describen efectos sobre rasgos individuales de los organismos. La mayoría de los estudios sobre radiación ionizante han examinado los efectos a nivel celular, de tejido o de individuo. Como se ha demostrado para productos químicos, los efectos observados a estos niveles pueden propagarse de tal manera que tengan consecuencias a niveles superiores de organización biológica (población, comunidad, ecosistema) (ej. [38, 39]). Sin embargo, muy pocos estudios han medido efectos a niveles superiores. Unos pocos han intentado extrapolar los efectos observados en individuos a lo que podría ocurrir en la población utilizando modelos de dinámica de poblaciones [40-42]. Estos modelos son un método valioso, infrautilizado, para predecir los efectos de factores ambientales de estrés, y por lo tanto se incluyen en esta SRA como una necesidad de que sean explorados más a fondo en radioecología.

En la Figura 2 se representan aspectos claves del Reto 2.

Reto 3: Mejorar la protección del hombre y de especies no humanas mediante la integración de la radioecología

El paradigma de una ruta contaminante-medio individual está cambiando hacia una visión holística integrada del medioambiente como un todo. La posición de la radioecología respecto a este cambio en el paradigma puede mantenerse mejor adoptando el concepto de integración- integración de los sistemas y métodos subyacentes de protección del hombre y del medioambiente y la integración de la radioecología con otras disciplinas científicas. Por lo tanto el éxito futuro de la radioecología, definido en sentido amplio como hacer frente a las necesidades de los grupos interesados, requerirá diversas maneras de integración y desde diferentes perspectivas.

En consecuencia, nuestra Visión Estratégica para la Integración de la Radioecología es que a lo largo de los próximos 20 años, la investigación en radioecología desarrolle una base científica para la integración holística de la protección del hombre y del medioambiente, así como sus sistemas de gestión asociados.

Para alcanzar esta visión será necesario trabajar en seis líneas de investigación.

Integrar las incertidumbres y la variabilidad de la modelización de la transferencia, la evaluación de exposición y la caracterización de los efectos, en la caracterización del riesgo

La caracterización del riesgo es el último paso del proceso de evaluación de riesgo, ya que integra información de los dos pasos anteriores: evaluación de exposición y caracterización de los efectos. Así, las evaluaciones de riesgo deben tener en cuenta simultáneamente: (a) la variabilidad de las dosis, dependiendo de la variabilidad espacial y temporal en la transferencia de radionucleidos, así como la heterogeneidad de comportamiento entre las especies expuestas, y (b) la variabilidad en radiosensibilidad entre especies, incluyendo la dependencia del género y del estado del desarrollo. Las mejoras en las evaluaciones de riesgo, y el aumento de la confianza en sus resultados, requieren que el Reto 3 integre todas las fuentes de variabilidad y sus incertidumbres asociadas en un cálculo único.

Integrar los sistemas de protección del hombre y del medioambiente

Durante la última década, se ha reconocido la necesidad de demostrar explícitamente la protección del medioambiente frente a los efectos de la radiación [19]. Se ha realizado un esfuerzo significativo en este sentido y actualmente está emergiendo un sistema de protección del medioambiente, junto con las herramientas necesarias para estimar la exposición, evaluar el riesgo y demostrar la protección [13]. Sin embargo, en algunas áreas importantes, las metodologías

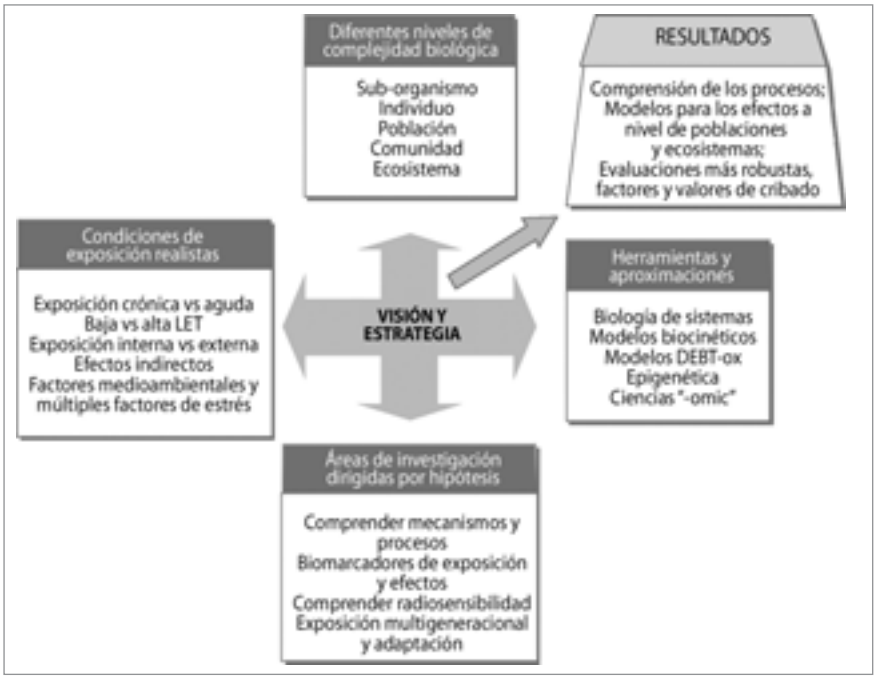


Figura 2. Esquema de los componentes y los resultados esperados de la agenda estratégica de investigación relacionados con el Reto 2: Determinar las consecuencias ecológicas en las condiciones realistas en las que los organismos están expuestos.

para humanos y otras especies difieren. Este problema se agrava debido a que las evaluaciones en humanos y en otras especies no son complementarias en términos de cómo se llevan a cabo. Las diferencias causan dificultades a los operadores, grupos interesados y reguladores. La integración de los dos sistemas de protección radiológica, tanto en términos de su filosofía subyacente como de su aplicación práctica mediante sistemas y herramientas adecuadas, ofrece beneficios significativos a muchos niveles. Sin embargo, el desarrollo de un sistema completo para integrar las evaluaciones de riesgo en humanos y ecológicas para radionucleidos, para cualquier situación de exposición específica, se encuentra todavía en una fase temprana [43], y sigue siendo un reto significativo para la radioecología, como sugirió Pentreath [14] en el contexto de la aproximación de la ICRP: "... será esencial considerar como se puede lograr la protección tanto del hombre como del medioambiente dentro de un sistema filosófico amplio, utilizando aproximaciones complementarias, basado en el mismo conocimiento científico subyacente".

Este reto se centrará en el desarrollo de métodos integrados para la evaluación en las áreas de la transferencia, exposición, dosimetría y riesgos, determinando en que aspectos es justificable y beneficiosa la harmonización de las aproximaciones utilizadas en humanos y en el medioambiente.

Integrar los sistemas de evaluación de riesgo para radiación ionizante y productos químicos

Los radionucleidos, y el riesgo que representan para el hombre y el medioambiente, por lo general ocurren como parte de un conjunto complejo de co-contaminantes y otros factores de estrés, como se ejemplifica en los vertidos de residuos de industrias nucleares y no nucleares, los sitios con contaminaciones complejas y las liberaciones como resultado de accidentes. Existe desde hace tiempo una falta clara de comprensión sobre las mezclas de contaminantes que incluyen materiales radiactivos. La investigación en radioecología, integrada con otras disciplinas y dirigida hacia una mejor comprensión de los efectos de mezclas, así como la adaptación de los métodos para la evaluación de riesgos con el objetivo de predecir los efectos de las mezclas, hará posible determinar si los criterios de protección radiológica son sólidos en un contexto de múltiples contaminantes.

Proporcionar una perspectiva multi-criterio en apoyo de una toma de decisiones optimizada

Las aproximaciones de gestión en situaciones de exposición planificada, existente y de emergencia, pueden ir desde la más simple, pasando por niveles ascendentes de complejidad y detalle. El principal impulsor de la investigación en radioecología en las próximas décadas es la necesidad de disponer de aproximaciones de gestión graduales e integradas, y de las herramientas para implementarlas para manejar el espectro completo de posibles efectos de la exposición, así como para asegurar la productividad y el beneficio social de las áreas afectadas. Los recientes acontecimientos de Fukushima en Japón ejemplifican estos problemas y las deficiencias existentes. Intrínsecamente ligado a esta necesidad está la exigencia de una ciencia rigurosa, fundamental y progresiva que respalde y aproveche al máximo estos esfuerzos.

Aunque el primer motivo para elegir las opciones de gestión en situaciones de exposición a radiación siempre será la reducción o prevención de la dosis, el problema es inherentemente multifactorial e involucra a numerosos grupos interesados. Existen necesidades importantes en otros sectores, economía, infraestructuras, servicios sociales, que

deben ser considerados cuando se seleccionan las opciones de gestión. Por lo tanto, hay una necesidad de optimizar las aproximaciones de gestión para la contaminación radiactiva que va más allá de la simple consideración de la dosis de radiación. La optimización requiere experiencia en áreas tales como la radioecología, el urbanismo, las ciencias sociales y económicas, la tecnología de la información, la gestión de residuos, las ciencias medioambientales y agrícolas, y la comunicación. Desde un punto de vista práctico, el proceso de optimización podría basarse en la integración de los Sistemas de Apoyo a la Decisión asociados con las ciencias radiológicas, con las bases de datos de conocimiento y las herramientas de ayuda a la decisión de otras disciplinas (ej. urbanismo, economía, sociología) de tal manera que los medioambientes contaminados se gestionen de una manera holística para el máximo beneficio de la sociedad.

El análisis multicriterio [44] proporciona un marco teórico adecuado que puede utilizarse para combinar factores cuantitativos y cualitativos y para guiar los procesos de toma decisiones hacia una solución satisfactoria (ya que no existe un óptimo global en la presencia de múltiples criterios, con frecuencia conflictivos). Mediante el uso de herramientas de decisión basadas en un análisis de decisión multicriterio, se pueden clasificar los factores de sensibilidad radioecológica regionales, en correspondencia con todos los parámetros medioambientales y antropogénicos que bien exacerban o mitigan las consecuencias de la contaminación.

Integrar las aproximaciones de ecosistemas, los servicios de ecosistemas y la economía ecológica con la radioecología

Una variedad de aproximaciones para la evaluación y gestión medioambiental están basadas en una aproximación más holística a las fuentes y consecuencias del cambio del ecosistema. Todos se centran en el ecosistema, en lugar de en los efectos a nivel de individuos, y se han vinculado a conceptos de sostenibilidad, indicadores medioambientales y al uso sostenible de los recursos. Estas aproximaciones hacen hincapié en las interacciones dinámicas inherentes entre los componentes del sistema (incluyendo los humanos), vías de retroalimentación potenciales y efectos indirectos. Al empezar a pensar en estos términos, la radioecología y la protección radiológica podrían ser más holísticas e integradoras, así como aumentar la compatibilidad con otras evaluaciones medioambientales y sistemas de protección. La aproximación de ecosistemas normalmente se utiliza en el contexto de la evaluación medioambiental y la protección medioambiental, pero también es una aproximación científica. Es, por su propia naturaleza, integradora con respecto a la ciencia y a la gestión, y considera todos los factores de estrés y factores ambientales potenciales que podrían afectar a la estructura y función del ecosistema, mientras que incluye al hombre como una parte integral del mismo. El concepto está muy extendido y se aplica en, por ejemplo, la Convención sobre Diversidad Biológica, la Directiva Hábitat de la Unión Europea, la Ley de Protección Medioambiental de Canadá, la Convención OSPAR para la protección del medioambiente marino del Atlántico Noreste, la Convención RAMSAR sobre los humedales costeros, y es prometedora como aproximación unificadora para la protección radiológica del medioambiente [45].

Los conceptos de servicios del ecosistema y economía ecológica se refieren principalmente a los beneficios finales de los ecosistemas para el hombre, ya sea financieramente o de otro modo, mientras que la aproximación de ecosistemas está posiblemente menos centrada en el hombre. Sin embargo, todas las aproximaciones comparten un reconocimiento fundamental de la integración y de la interdependencia del hombre y el medioambiente. Los servicios del ecosistema son los beneficios que las personas obtienen del ecosistema. Estos incluyen servicios de aprovisionamiento, como agua y comida; servicios de regulación como el control de inundaciones y enfermedades; servicios culturales como los beneficios espirituales, recreativos y culturales; y servicios de apoyo como el ciclo de nutrientes, que mantienen las condiciones para la vida en la tierra [46]. Dentro de la economía ecológica, el concepto ha sido utilizado como una manera de asignar un valor económico a los ecosistemas, que de otra forma no tienen un precio explícito [47]. Esto permite una conexión directa entre los resultados ecológicos y las consecuencias económicas, de tal manera que los científicos, economistas y gestores pueden usar los mismos términos y unidades para describir los cambios ecológicos.

El concepto de Servicios Ecológicos está aumentando en importancia en la formulación de la política medioambiental y en los desarrollos de nuevos métodos de evaluación de riesgos medioambientales, debido a que es un sistema conceptual coherente, a su capacidad de integrar los compartimentos ambientales o métodos de evaluación, a su aplicabilidad en una serie de escalas espaciales y temporales, y a su fuerza como herramienta de comunicación [48, 49]. Sin embargo, la ciencia y los métodos de valoración necesarios para ponerlo en práctica siguen estando en su infancia, aunque se están produciendo avances en otros campos de la ciencia (ej., [48-52]). Teniendo en cuenta el gran impacto social y económico de la contaminación con radiación, la aproximación de Servicios Ecológicos tiene un gran potencial y podría estimular una mayor participación de los grupos interesados en la protección radiológica.

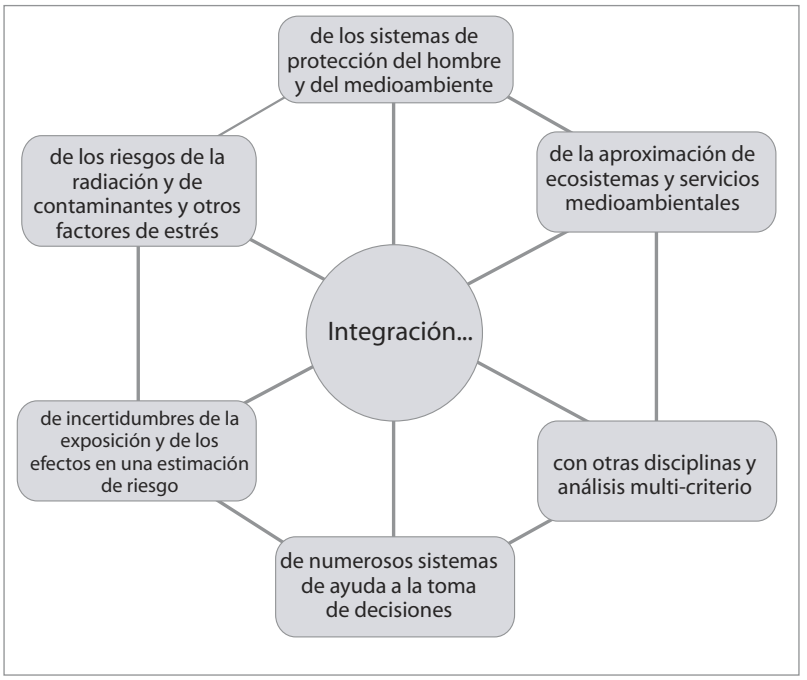


Figura 3. Seis áreas en el Reto 3: Mejorar la protección del hombre y del medioambiente mediante la integración de la radioecología.

Integrar los sistemas de apoyo a la toma de decisiones

Los sistemas de ayuda a la toma de decisiones (DSS, del inglés *Decision Support Systems*) –sistemas computarizados que facilitan la gestión de grandes cantidades de datos y que proporcionan asistencia en el análisis, la interpretación y la presentación de datos– representan en gran medida la "cara" visible de la radioecología, y constituyen un nexo importante entre la investigación en radioecología y los grupos interesados. En el área de los DSS, son evidentes tres aspectos de como la integración será beneficiosa: (a) integración de los DSS radioecológicos; (b) DSS para evaluaciones integradas; y (c) integración de los DSS para situaciones de exposición existente y planificada con los sistemas para exposiciones de emergencia. Como se desprende de las conclusiones de EVANET-TERRA e HYDRA, los DSS disponibles en la actualidad son dispares en cuanto a las situaciones de exposición y medioambientes a los que se pueden aplicar, los nucleidos implicados y las plataformas técnicas, lo que refleja el estado de fragmentación de la radioecología en Europa durante los últimos 10-15 años.

El desarrollo de DSS para exposiciones planificadas/existentes y para exposiciones de emergencia ha seguido en gran medida dos trayectorias paralelas. Los DSS para exposiciones de emergencia tienden a carecer de componentes radioecológicos avanzados, mientras que los DSS para exposiciones planificadas y existentes a menudo carecen de los medios para manejar las escalas espaciales que incluyen los DSS para exposiciones de emergencia. El accidente de Fukushima bien ha demostrado los problemas inherentes a la falta de convergencia entre estas vías de desarrollo y la falta de disponibilidad de herramientas para situaciones dinámicas en las que la transición entre las situaciones de exposición de emergencia y de exposición existente no está clara. La iniciativa NERIS-TP ha identificado las necesidades para el ulterior desarrollo de los DSS para exposiciones de emergencia y para el compromiso de los grupos interesados dentro de sus actividades estratégicas. La integración de la radioecología, tal y como se ejemplifica en la iniciativa STAR, sus actividades y objetivos de investigación con la plataforma NERIS será un paso adelante en el desarrollo de la próxima generación de DSS.

En la Figura 3 se representan aspectos claves del Reto 3.

PRÓXIMOS PASOS: ALCANZAR CONSENSO Y DESARROLLAR LA "HOJA DE RUTA"

La adquisición de nuevos conocimientos científicos mediante la investigación en radioecología es un elemento crucial para la protección del hombre y del medioambiente contra efectos nocivos, así como para responder a las inquietudes de los grupos interesados en relación a la presencia de radionucleidos en el medioambiente. Dichos estudios son importantes para la sociedad ya que la sobre estimación de las exposiciones o de los efectos podría llevar a restricciones costosas innecesarias; alternativamente, la subestimación del riesgo resultará en daños al hombre y al medioambiente. La única manera de proporcionar soluciones rápidas y eficaces a los difíciles problemas resaltados en la SRA, es un programa de investigación impulsado por hipótesis con claros objetivos comunes y recursos compartidos entre la comunidad internacional de radioecología. Para que la sociedad obtenga una contribución significativa de la radioecología del futuro, se necesita una aproximación a largo plazo, multidisciplinar, que vaya más allá de las fronteras nacionales.

Las declaraciones de la visión y la agenda estratégica presentadas en este artículo, se concentran en los aspectos de investigación de la radioecología. La agenda estratégica final también incluirá planes sobre otros aspectos igualmente importantes de nuestra ciencia (es decir, el mantenimiento de las infraestructuras cruciales para radioecología; necesidades de educación y formación; la contratación; así como la

gestión y diseminación del conocimiento). Las otras fases se desarrollarán durante los próximos dos años, con contribuciones de los grupos interesados y de la amplia comunidad de radioecología

Desarrollar una SRA no es un proceso lineal, sino que es un proceso que debe tener vías de retroalimentación diseñadas para que haya continuas aportaciones e innovación. Para nuestro conocimiento, esta es la primera Agenda Estratégica de Investigación en Radioecología. Nuestra expectativa es que una SRA para Radioecología se centre y priorice nuestros esfuerzos colectivos, lo que resultará en un valor añadido y en un avance más rápido en nuestra comprensión de la radioactividad ambiental, así como de nuestra habilidad para predecir sus efectos. Invitamos a todos los que estén interesados a que contribuyan y participen en el desarrollo posterior de la SRA.

AGRADECIMIENTOS

Los fondos para realizar la Agenda Estratégica de Investigación fueron proporcionados, en parte, por la Comisión Europea, bajo el número de Contrato Fission-2010-3.5.1-269672. Las sugerencias del Consejo Asesor Externo de STAR (Rick Jones, Dick Roelofs, Nina Cedergreen, Maria Betti, Mikhail Balonov, Satoshi Yoshida y Valery Forbes) fueron muy apreciadas y mejoraron una versión anterior de este documento.

BIBLIOGRAFÍA

[1] FUTURAE, 2008. Deliverable 4: Networking a Way for Maintaining and Enhancing Radioecological Competences in Europe. http://www.futurae.org/index.php? option1/4com_content&task1/4view&id1/428&Itemid1/41.

[2] Whicker, F.W., Shaw, G., Voigt, G., Holm, E., 1999. Radioactive contamination: state of the science and its application to predictive models. Environ. Pollut. 100, 133e149.

[3] Hinton, T.G., 2000. Strong inference, science fairs and radioecology. J. Environ. Radioact. 51, 277e279.

[4] Brechignac, F., et al., 2003. Protection of the environment in the 21st century: radiation protection of the biosphere including human kind. Statement of the international union of radioecology. J. Environ. Radioact. 70, 155e159.

[5] Calow, P., Forbes, V., 2003. Does ecotoxicology inform ecological risk assessment? Environ. Sci. Technol. 37, 146Ae151A.

[6] Brown, J.E., Jones, S., Saxen, R., Thorring, H., Vives, I., Batlle, J., 2004. Radiation doses to aquatic organisms from natural radionuclides. J. Radiol. Prot. 24, A63eA77.

[7] Eggen, R., Behra, R., Burkhardt-Holm, P., Escher, B., Schweigert, N., 2004. Challenges in ecotoxicology. Envion. Sci. Technol. 38, 58Ae64A.

[8] Garnier-Laplace, J., Gilek, M., Sundell-Bergman, S., Larsson, C.-M., 2004. Assessing ecological effects of radionuclides: data gaps and extrapolation issues. J. Radiol. Prot., A139eA155.

[9] Shaw, G., 2005. Applying radioecology in a world of multiple contaminants. J. Environ. Radioact. 81, 117e130.

[10] Alexakhin, R., 2006. Radioecology: history and state-of-the-art at the beginning of the 21st century. In: Cigna, A., Durante, M. (Eds.), Radiation Risk Estimates I. Normal and Emergency Situations. Springer Publishing, pp. 159e168.

[11] OECD-NEA, 2007. Organisation for Economic Cooperation and Development. Nuclear Energy Agency, Scientific Issues and Emerging Challenges for Radiological Protection. Report Of Expert Group Implications Radiological Prot. Sci.. NEA No. 6167; OECD Publishing; 2 rue André-Pascal, 75775 Paris.

[12] Brechignac, F., et al., 2008. Integrating environment protection, a new challenge: strategy of the international union of radioecology. Radioprotection 43, 339e356.

[13] Larsson, C.-M., 2008. An overview of the ERICA integrated approach to the assessment and management of environmental risks from ionising contaminants. J. Environ. Radioact. 99, 1364e1370.

[14] Pentreath, R.J., 2009. Radioecology, radiobiology, and radiological protection: frameworks and fractures. J. Environ. Radioact. 100, 1019e1026.

[15] Salbu, B., 2009. Challenges in radioecology. J. Environ. Radioact. 100, 1086e1091

[16] Repussard, J. 2011. Radioecology for tomorrow: an international challenge, both scientific and operational. Presented at the International Conference on Radioecology and environmental radioactivity. Hamilton, Ontario, Canada; 19 June 2011.

[17] Artigas, J., et al., 2012. Towards a renewed research agenda in ecotoxicology. J. Environ. Radioact. 16), 201e206.

[18] IAEA (International Atomic Energy Agency), 2006. Fundamental Safety Principles. IAEA Safety Standards for Protecting People and the Environment. Safety Fundamentals SF-1. International Atomic Energy Agency, Vienna.

[19] ICRP, 2007. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103, Ann. ICRP 37 (2e4).

[20] ICRP, 2008. Environmental Protection e the Concept and Use of Reference Animals and Plants. ICRP Publication 108, Ann. ICRP 38 (4e6).

[21] Avila, R., et al., 2004. Study of the uncertainty in estimation of the exposure of nonhuman biota to ionising radiation. J. Radiol. Prot. 24, A105eA122.

[22] Ng, Y.C., 1982. A review of transfer factors for assessing the dose from radionuclides in agricultural products. Nucl. Saf. 23, 57e71.

[23] IAEA (International Atomic Energy Agency), 2009. Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments. IAEA TECDOC Series No. 1616.

[24] Copplestone, D., Hingston, J., Real, A., 2008. The development and purpose of the FREDERICA radiation effects database. J. Environ. Radioact. 99, 1456e1463.

[25] Williams, C. (Ed.), 2004. Framework for Assessment of Environmental Impact (FASSET) of Ionising Radiation in European Ecosystems. Journ. Rad. Prot., vol. 24 (4A) (special issue).

[26] Howard, B.J., Beresford, N.A., Andersson, P., Brown, J.E., Copplestone, D., Beaugelin-Seiller, K., Garnier-Laplace, J., Howe, P.D., Oughton, D., Whitehouse, P., 2010. Protection of the environment from ionising radiation in a regulatory context e an overview of the PROTECT coordinated action project. J. Radiol. Prot. 30, 195e214.

[27] Van Straalen, N., 2003. Ecotoxicology becomes stress ecology. Environ. Sci. Technol. 37, 324Ae330A.

[28] Mothersill, C.E., Smith, R.W., Seymour, C.B., 2009. Molecular tools and the biology of low-dose effects. BioScience 59, 649e655.

[29] Handy, R.D., 2008. Systems toxicology: using the systems biology approach to assess chemical pollutants in the environment. Adv. Experim. Bio. 2, 249e281.

[30] Kooijman, S.A.L.M., 2000. Dynamic Energy and Mass Budgets in Biological Systems, second ed. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

[31] UNSCEAR. 2008. vol. II. Sources of Ionizing Radiation United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly, with Scientific Annexe E. United Nations, New-York, 313 pp.

[32] Harrison, F.L., Anderson, S.L., 1996. Taxonomic and development aspects of radiosensitivity. In: Amiro, B., Avadhanula, R., Johansson, G., Larsson, C.M., Luning, M. (Eds.), Proceedings Of the Symposium: Ionizing Radiation, the Swedish Radiation Protection Institute (SSI) and the Atomic Energy Control Board (AECB) of Canada, 20e24 May, 1996, Stockholm, Sweden, pp. 65e88.

[33] Fuma, S., Watanabe, Y., Kawaguchi, I., Takata, T., Kubota, Y., Ban-nai, T., Yoshida, S., 2012. Derivation of hazardous doses for amphibians acutely exposed to ionizing radiation. J. Environ. Radioact. 103, 15e19.

[34] Hinton, T.G., Aizawa, K., 2007. A layperson's primer on multiple stressors. In: Mothersill, C., Mossee, I. (Eds.), Multiple Stressors: a Challenge for the Future. NATO Advance Research Workshop; Science for Peace Series. SpringerLink, Netherlands, ISBN 978-1-4020-6333-6, pp. 57e69.

[35] Doi, M., Kawaguchi, I., Tanaka, N., 2005. Model ecosystem approach to estimate community level effects of radiation. Radioprotection 40 (Suppl. 1), s913es919.

[36] Fuma, S., Ishii, N., Takeda, H., Doi, K., Kawaguchi, I., Shikano, S., Tanaka, N., Inamori, Y., 2010. Effects of acute g-irradiation on community structure of the aquatic microbial microcosm. J. Environ. Radioact. 101, 915e922.

[37] Geras'kin, S.A., Fesenko, S.V., Alexakhin, R.M., 2008. Effects of non-human species irradiation after the Chernobyl NPP accident. Environ. Int. 34, 880e897.

[38] Forbes, V.E., Calow, P., 2002. Population growth rate as a basis for ecological risk assessment of toxic chemicals. Philosophical Trans. Royal Soc. London Ser. B Biol. Sci. 357, 1299e1306.

[39] Forbes, V.E., Calow, P., Grimm, V., Hayashi, T.I., Jager, T., Katholm, A., Palmqvist, A., Pastorok, R., Salvito, D., Sibly, R., Spromberg, J., Stark, J., Stillman, R.A., 2011. Adding value to ecological risk assessment with population modelling. Hum. Ecol. Risk Assess. 17, 287e299.

[40] Woodhead, D.S., 2003. A possible approach for the assessment of radiation effects on populations of wild organisms in radionuclide-contaminated environments? J. Environ. Radioact. 66, 181e213.

[41] Alonzo, F., Hertel-Aas, T., Gilek, M., Gilbin, R., Oughthon, D., Garnier-Laplace, J., 2008. Modelling the propagation of effects of chronic exposure to ionizing radiation from individuals to populations. J. Environ. Radioact. 99, 1464e1473.

[42] Vives i Batlle, J., Wilson, R.C., Watts, S.J., McDonald, P., Jones, S.R., Vives-Lynch, S.M., Craze, A., 2010. An approach to the assessment of risk from chronic radiation to populations of European lobster, Homarus gammarus (L.). Radiat. Environ. Biophys. 49, 67e85.

[43] Copplestone, D.C., Brown, J.E., Beresford, N.A., 2010. Considerations for the integration of human and wildlife radiological assessments. J. Radiol. Prot. 30, 283e297.

[44] Linkov, I., Moberg, E., 2012. Multi-Criteria Decision Analysis; Environmental Applications and Case Studies. CRC Press, Boca Raton, FL, 186 pp.

[45] Bréchignac, F., Bradshaw, C., Carroll, S., Jaworska, A., Kapustka, L., Monte, L., Oughton, D., 2011. Recommendations from the international union of radioecology to improve guidance on radiation protection. Integrated Environ. Assess. Manag. 7, 411e413.

[46] Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Island Press, Washington, DC, 160 pp. http://www.maweb.org/en/ index.aspx.

[47] Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farberk, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., van den Belt, M., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature 387, 253e260.

[48] Faber, J., van Wensem, J., 2012. Elaborations on the use of the ecosystem services concept for application in ecological risk assessment for soils. Sci. Total. Environ. 415, 3e8.

[49] Nienstedt, K., Brock, T., van Wensem, J., Montforts, M., Hart, A., Aagaard, A., Alix, A., Boesten, J., Bopp, S., Brown, C., Capri, E., Forbes, V., Köpp, H., Liess, M., Luttik, R., Maltby, L., Sousa, J., Streiss, F., Hardy, A., 2012. Development of a framework based on an ecosystem services approach for deriving specific protection goals for environmental risk assessment of pesticides. Sci. Total. Environ. 415, 31e38.

[50] SETAC Ecosystem Services Advisory Group (ES-AG), 2012. Summary of the 5th SETAC Europe special science symposium: ecosystem services-from policy to practice. SETAC Globe 13 (3).

[51] Thomsen, M., Faber, J., Sorensen, P., 2012. Soil ecosystem health and services e evaluation of ecological indicators susceptible to chemical stressors. Ecol. Indicators 16, 67e75.

[52] Paetzold, A., Warren, P., Maltby, L., 2010. A framework for assessing ecological quality based on ecosystem services. Ecol. Complexity 7, 273e281.