Evaluación de la seguridad radiológica de los repositorios de desechos

Examen de los procedimientos, los métodos y los problemas

por Gordon Linsley

En los últimos años se han desarrollado técnicas para el análisis de la seguridad de los repositorios de desechos, con el propósito de corresponder a los esfuerzos mundiales por hallar métodos óptimos para la evacuación de desechos radiactivos. Al proyectar un sistema de evacuación adecuado, deben tomarse en consideración los resultados de los análisis de seguridad con miras a garantizar su conformidad con el criterio radiológico establecido por las autoridades nacionales.

En este artículo se ofrece una breve reseña de las principales características de los procedimientos de análisis de seguridad, se señalan las esferas en que se plantean problemas y se ilustran métodos haciendo referencia a los resultados de algunos análisis de seguridad.*

Normas radiológicas

La mayor parte de las normas de protección radiológica vigentes se fundamentan en las recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR). Estas comprenden un sistema de limitación de dosis que contiene los tres principios básicos, la justificación de una práctica, la optimización de la protección y la limitación de las exposiciones individuales a las radiaciones.

El sistema de limitación de dosis se concibió para las exposiciones a las radiaciones provenientes de fuentes o prácticas que se producen en realidad, por ejemplo, en el caso de exposiciones profesionales o en la liberación habitual controlada de efluentes al medio ambiente.

Sin embargo, en el caso de la evacuación de desechos radiactivos no hay certeza de que se producirá la exposición humana dado que, en muchos casos, los repositorios se diseñan para mantener el aislamiento durante períodos muy prolongados. Con miras a realizar análisis de seguridad, se examinan diversos escenarios en que podrían producirse descargas de radionucleidos al medio ambiente y que podrían entrañar la exposición de los seres humanos a las radiaciones, por ejemplo, por migraciones a consecuencia de fugas del repositorio o por intrusión accidental en el repositorio.

Debido a las precauciones que se toman al diseñar los repositorios, hay pocas probabilidades de que se produzcan acontecimientos que den por resultado la exposición de seres humanos. Los plazos que deben considerarse son extremadamente largos y, en, consecuencia, surgen diversas interrogantes, referentes, por ejemplo, a las normas de protección adecuadas para las poblaciones futuras y a los problemas que plantean las crecientes incertidumbres en la predicción.

Para tomar en cuenta estos aspectos especiales, se están elaborando criterios radiológicos referidos concretamente a la evacuación de desechos sólidos. Uno de los nuevos aspectos es la tendencia hacia la limitación del riesgo (así como a la limitación de las dosis). En este caso, el riesgo se calcula como la probabilidad de que una dosis de radiación se reciba, multiplicada por la probabilidad de que la dosis recibida dé lugar a efectos nocivos sobre la salud. Ello permite colocar en una perspectiva adecuada aquellos acontecimientos que supuestamente tendrían una consecuencia radiológica alta (pero pocas probabilidades de ocurrir); por ejemplo, los daños ocasionados a los repositorios por meteoritos.

Aunque este tipo de criterio refleja con mayor exactitud la naturaleza del riesgo radiológico de la evacuación subterránea de desechos sólidos, se reconoce que puede haber dificultades con la aplicación práctica. Así sucede especialmente con la especificación de la probabilidad de que ocurran acontecimientos que den lugar a una exposición.

El Sr. Linsley es funcionario de la División del Ciclo del Combustible Nuclear del Organismo.

* En los documentos de la *Colección Seguridad* del Organismo se brinda asesoramiento sobre los métodos para evaluar la seguridad en la evacuación en formaciones geológicas, a poca profundidad y en el medio ambiente marino.

Las investigaciones en el campo y los ensayos de laboratorio proporcionan conocimientos de incalculable valor para evaluar la seguridad de las instalaciones de evacuación de desechos (Foto: AIF)

Metodología para las evaluaciones de la seguridad

La mayoría de los principios relacionados con la evaluación de la seguridad en una instalación situada a poca profundidad son comunes a los que rigen para los repositorios de desechos de alta actividad (DAA) en formaciones geológicas profundas.

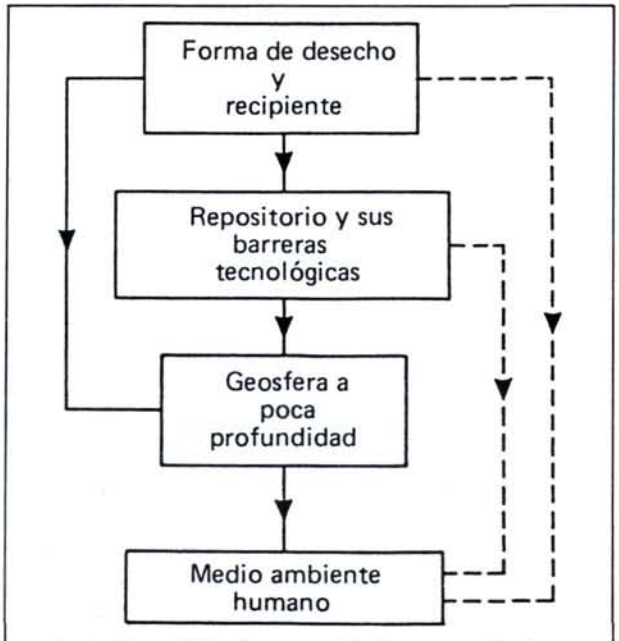
En el caso de una instalación situada a poca profundidad, el sistema de evacuación puede describirse como una combinación de los componentes siguientes (véase el diagrama):

- Tipo de desecho, forma de desecho y, cuando proceda, estabilizador, contenedor, sobreenvase y/o retardador de la migración.
- El repositorio y sus barreras tecnológicas, incluidos el relleno de las excavaciones y la capa vegetal.
- La geosfera a poca profundidad (sedimentos, rocas) en el emplazamiento del repositorio.
- El medio humano (suelo, aguas superficiales, acuíferos a poca profundidad, atmósfera, biota).

El análisis de la seguridad de ese sistema tiene los tres componentes básicos siguientes:

- Determinación de los fenómenos que podrían provocar la emisión de radionucleidos, o influir en la tasa a que se producen las emisiones o influir sobre la tasa de transporte de radionucleidos a través del medio ambiente.
- Cálculo de las probabilidades de que ocurran estos fenómenos y cuantificación de sus efectos sobre el sistema de evacuación.
- Cálculo de las consecuencias radiológicas de las emisiones (es decir, las dosis que recibirían las personas y las poblaciones y, de ser necesario, cálculo de los efectos ulteriores sobre la salud).

Los dos primeros rubros por lo general se examinan bajo el título de "análisis de escenarios", y usualmente se hace referencia al tercero como "análisis de consecuencias".



Los radionucleidos de un repositorio poco profundo podrían liberarse y ser transportados al medio ambiente humano de diversas maneras. Las líneas discontinuas representan una situación anormal.

Análisis de escenarios

Los fenómenos que pueden ser pertinentes para el análisis de escenarios en relación con repositorios a poca profundidad son las actividades humanas (por ejemplo, la construcción, el cultivo de la tierra, las perforaciones en busca de recursos minerales); los procesos y acontecimientos naturales (erosión, inundaciones, movimiento de aguas subterráneas); y los procesos que se operan en los desechos y los repositorios (generación de gases, perturbación mecánica del suelo o de las rocas en el emplazamiento del repositorio).

Los resultados de los análisis de escenarios consisten en la definición de los escenarios (o sea, de los parámetros de emisión y transporte necesarios para los análisis de consecuencias), y los cálculos de las probabilidades de que ocurra lo previsto en esos escenarios en función del tiempo. Cuando se realizan análisis de escenarios para sistemas y emplazamientos de evacuación concretos, por regla general es posible dejar de considerar en detalle algunos fenómenos potencialmente pertinentes, bien porque sea muy poco probable que ocurran, bien porque se puede demostrar que sus efectos con insignificantes.

Análisis de consecuencias

Una vez definidos los escenarios de emisiones de los repositorios, deben calcularse sus consecuencias para los seres humanos. Para calcular las consecuencias hay que elaborar un sistema de cómputo que permita representar en modelo el transporte de los radionucleidos a través del medio ambiente hasta los seres humanos y evaluar las dosis de radiación.

Como primer paso, se hace un pronóstico de las tasas de emisión de radionucleidos a partir del repositorio, seguido de estimaciones de las concentraciones de radionucleidos en los diversos sectores del medio ambiente. El segundo paso consiste en un pronóstico de las tasas de transporte de las emisiones de radionucleidos entre los diversos sectores y los seres humanos. El tercer paso comprende un pronóstico de la acción recíproca entre los radionucleidos y los seres humanos, que da por resultado el cálculo de las dosis para los individuos y para la población de cada escenario definido durante el análisis de escenarios.

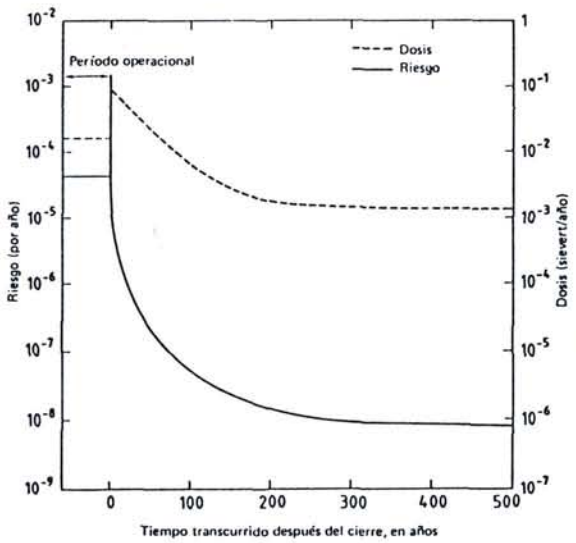
El análisis de consecuencias entraña seguir el avance de las emisiones de radionucleidos hacia los seres humanos por diversas vías, por ejemplo, a través del agua potable y el consumo de alimentos acuáticos, el baño y la natación, y, de manera más indirecta, por conducto de las plantas y los animales domésticos (las plantas pueden acumular radionucleidos por la vía del riego o a través de la capa vegetal).

Los resultados del análisis de seguridad general pueden expresarse de diversas formas en dependencia del criterio radiológico que deba satisfacerse, por ejemplo, en términos de probabilidades, dosis individuales, riesgos individuales y dosis y riesgos colectivos. (Véanse en el recuadro adjunto los resultados de un análisis genérico).

Estudios genéricos y estudios sobre emplazamientos concretos

Conviene distinguir entre los estudios genéricos y los estudios sobre emplazamientos concretos. Por lo general, el estudio genérico se realiza en una etapa inicial de

Ejemplo de análisis genérico



En este ejemplo se muestran los resultados de una evaluación genérica de las dosis y los riesgos individuales máximos anuales de la evacuación de desechos de baja actividad en general en una zanja de evacuación de poca profundidad con un mínimo de tecnología. Los escenarios que se analizaron fueron el contacto con agua seguido de la migración de radionucleidos; incendios en la zanja de en rramiento durante la fase operacional; y alteraciones ocasionadas por el hombre tras el cierre del emplazamiento y el levantamiento de las restricciones de empleo. (Para hacer estos cálculos, se supuso que las restricciones en el uso del emplazamiento se levantaron tan pronto concluyeron las operaciones.) Las dosis máximas individuales se calcularon suponiendo que cada emisión propuesta en los escenarios se produce realmente, en tanto que los cálculos de riesgo individual toman en consideración la probabilidad de que se produzca el hecho. En los períodos señalados, los riesgos potenciales para los individuos se deben principalmente a exposiciones en el transcurso de posibles excavaciones con fines de construcción y, con posterioridad, principalmente a consecuencia del cultivo de la tierra y de vías hídricas. Un uso concreto de los cálculos genéricos de este tipo es dar una indicación preliminar de los períodos en que probablemente sea preciso restringir el acceso al emplazamiento, tras el cierre de las operaciones en el emplazamiento, a fin de cumplir con los criterios radiológicos. (Fuente: Pinner y cols., Reino Unido, 1984)

planificación, cuando tal vez aún no se haya determinado un emplazamiento real y se dispone de escasa información pertinente para fines evaluativos. Las suposiciones son, necesariamente, muy generales, y los valores de parámetros que se han de utilizar en la elaboración de modelos sólo pueden obtenerse de la literatura científica; su elección requiere un juicio experto. Las suposiciones y los datos que se utilizan en esos estudios tienden a tener un sesgo conservador a fin de evitar posibles subestimaciones al no contar con una información más adecuada.

Los estudios genéricos son valiosos dado que sirven para centrar la atención en aspectos que probablemente son los más importantes desde el punto de vista radiológico, y, en consecuencia, permiten asignar adecuadamente las prioridades de investigación. En particular, señalan los escenarios, las vías hacia los seres humanos y los radionucleidos que probablemente sean los más importantes de los que se encuentran en los desechos. El realismo y la fiabilidad de las evaluaciones pueden mejorarse a medida que se disponga de más información sobre el diseño de los repositorios de desechos y su ubicación futura.

Es necesario hacer un estudio sobre el emplazamiento concreto antes de que se pueda obtener la licencia para una instalación de evacuación de desechos. En ese estudio se utiliza toda la información que puede acopiarse acerca del repositorio, su emplazamiento y el medio circundante.

En los últimos años se ha apreciado en algunos países el desarrollo progresivo de las evaluaciones de seguridad, desde estudios genéricos preliminares hasta evaluaciones más realistas utilizando datos relacionados con repositorios y medios bien definidos. (Véase el recuadro adjunto, tomado del Nagra Project Gewähr, que muestra gráficamente ese desarrollo progresivo en relación con la evacuación subterránea de desechos de alta actividad.)

Fiabilidad de los pronósticos basados en modelos

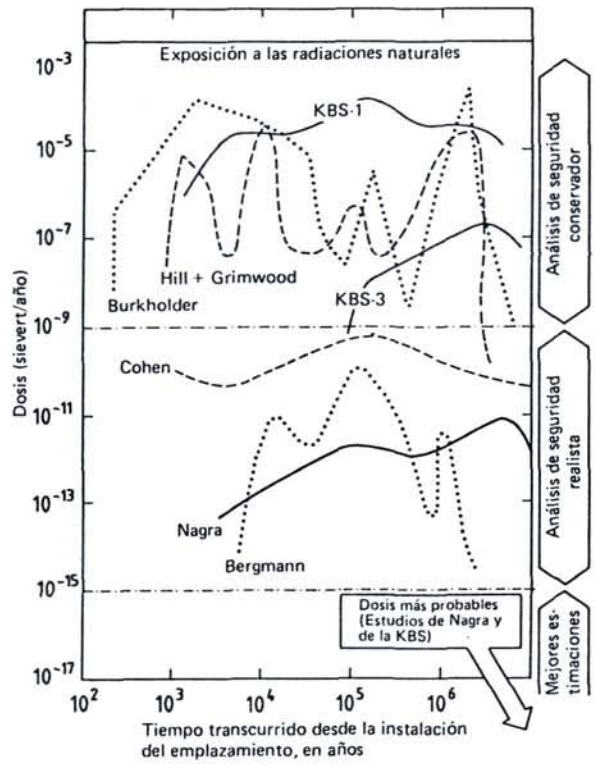
Dado que la evaluación de la seguridad de los repositorios de desechos radiactivos depende en gran medida del empleo de modelos matemáticos, es necesario analizar hasta qué grado puede confiarse en sus pronósticos.

Todos los modelos ambientales tienen necesariamente alguna incertidumbre asociada a sus pronósticos, ya que constituyen representaciones simplificadas de sistemas ambientales complejos. En lo que se refiere a las evaluaciones de la seguridad de los repositorios, el problema de la incertidumbre de los modelos es especialmente difícil de solucionar. Esto se debe a que es difícil obtener resultados experimentales y mediciones ambientales directamente pertinentes para emplearlos en la comprobación de la validez de los modelos, sobre todo teniendo en cuenta los largos períodos durante los cuales se aplican. Empero, hay diversos enfoques que el asesor en materia de seguridad puede utilizar para elevar la confianza que cabe tener en los resultados de la aplicación del modelo.

- Lo ideal sería comprobar la validez del modelo comparando sus pronósticos con observaciones adecuadas. No es posible comprobar plenamente la validez de todos los modelos empleados en los análisis de seguridad de repositorios de desechos, pero puede lograrse la comprobación parcial de la validez de algunos submodelos utilizando datos experimentales de laboratorio y de campo.
- En algunos casos pueden realizarse tipos de comprobación menos controlada estableciendo comparaciones con sistemas naturales que contienen radionucleidos naturales; por ejemplo, Oklo (Gabón) y Morro de Ferro (Brasil). Estos tienen la ventaja de proporcionar una evidencia real de los procesos de transporte durante plazos extremadamente prolongados, que deben tenerse en cuenta en relación con la evacuación de desechos bajo tierra. Las dificultades de este tipo de comprobación radican en que generalmente las condiciones experimentales no se comprenden bien y pueden no ser directamente pertinentes para el medio del repositorio.
- Un método para evitar el problema de la incertidumbre del modelo es la utilización de modelos del "peor caso".

Progresión de las evaluaciones de seguridad

Aquí se muestran los resultados (dosis anuales calculadas) de diversos estudios de seguridad sobre la evacuación definitiva de desechos de alta actividad (DAA) y elementos de combustible irradiado. Aunque los estudios se relacionan con diferentes tipos de formas de desechos, contención, repositorios, y medios geológicos, hay una tendencia general hacia el pronóstico de dosis individuales inferiores a medida que se introduce más realismo en las evaluaciones. Probablemente Suecia haya elaborado los análisis de segudidad más amplios realizados hasta la fecha (el KBS-1 para los DAA vitrificados en 1978, y el KBS-3 para el combustible irradiado no elaborado en 1983). Ambos estudios tratan de la evacuación en granito, y los datos geológicos, hidrogeológicos y geoquímicos se derivan de los resultados de investigaciones concretas en el campo. Los estudios fueron realizados por la KBS para el Gobierno de Suecia, que los aceptó en calidad de demostración de la gestión, y sirvieron de base para tomar una decisión sobre la concesión de licencias para la entrada en funcionamiento de las centrales nucleoeléctricas suecas. Los estudios suizos (Nagra) tienen un objetivo similar. Algunos trabajos iniciales de orientación han contribuido en gran medida a esclarecer el comportamiento de los repositorios y a desarrollar la metodología de análisis. Los cálculos de modelos de Burkholder (EE.UU., 1976) eran estudios genéricos para DAA en suelos porosos. Los de Hill and Grimwood (Reino Unido, 1978) fueron estudios genéricos para DAA vitrificados en roca cristalina. El mérito de estos estudios radica particularmente en los análisis de sensibilidad efectuados para evaluar la importancia relativa de los diversos parámetros de las barreras, y en que permiten formular criterios para la selección de emplazamientos de repositorios. Los estudios de Bergmann (EE.UU., 1978) trataron sobre la evacuación definitiva de DAA en formaciones de sal y esquisto descritas genéricamente. Las opciones de evacuación en sal o anhidrita suelen dar por resultado dosis de radiación no pronosticadas por conducto de vías de migración. Debido a que estas rocas secas no contienen agua, no existen en absoluto mecanismos de emisión "normales".



Por lo general, las dosis de radiación importantes sólo se producen en escenarios de accidente propuestos, tales como la penetración de agua por fallos o por exposición antropogénica del repositorio. (Fuente: Nagra Project Gewähr, Suiza, 1985)

Este método no indica la fiabilidad del pronóstico, pero permite confiar en que difícilmente el pronóstico adolezca de subestimación. Puede emplearse para demostrar que las dosis se hallan muy por debajo de los límites, como, por ejemplo, en los estudios genéricos a que se hace referencia anteriormente.

- Los ejercicios de comparación de modelos desempeñan un valioso papel en la evaluación de la seguridad. Permiten comprobar la exactitud numérica de los códigos utilizados para la elaboración de los modelos, pero además pueden usarse para comparar los diversos métodos de elaboración de modelos en cuanto a la predicción de las transferencias en determinadas circunstancias. Esto da por resultado que a menudo se obtengan valiosos conocimientos. Actualmente, se están realizando diversos ejercicios internacionales de comparación de modelos relacionados con la evacuación subterránea de desechos; por ejemplo, el proyecto INTRACOIN, patrocinado por Suecia (modelos de transporte geosférico de radionucleidos en el campo lejano), el HYDRACOIN (modelos de transporte por aguas subterráneas) y el BIOMOVS (modelos de transporte biosférico de radionucleidos).
- Pueden emplearse técnicas estadísticas para evaluar los efectos que tiene la incertidumbre de los valores de los parámetros de los datos de entrada de cada modelo sobre la incertidumbre de los pronósticos generales del modelo. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que este tipo de análisis de incertidumbre no proporciona una comprobación de la validez del propio modelo.

La demostración de la fiabilidad de los pronósticos de transferencia de radionucleidos a partir de repositorios subterráneos no es operación fácil, y a menudo constituye un proceso indirecto. La confianza en los pronósticos de los modelos tiene que crearse mediante el empleo combinado de diversas técnicas, tales como la comprobación de la validez, la comparación de modelos y el análisis de la incertidumbre de los parámetros.

Investigación continua

En resumen, los resultados de los estudios de seguridad indican que la repercusión radiológica de los repositorios de desechos será pequeña, y que puede alcanzarse la conformidad con las normas de protección radiológica. Empero, se reconoce que existen considerables incertidumbres asociadas a estas evaluaciones, principalmente a causa de los largos plazos con que se relacionan. En la actualidad, muchas de las actividades de investigación que se llevan a cabo en esta esfera tienen por objeto reducir las incertidumbres.

Es de interés señalar que gran parte del progreso alcanzado en esta materia se debe a actividades a escala internacional mediante ejercicios de comparación recíproca y de comprobación, así como mediante debates en foros internacionales.