

# Tecnologías de las radiaciones para el tratamiento de desechos: Una perspectiva global

*Algunos países estudian diversos sistemas para la desinfección y la descontaminación por irradiación de desechos líquidos y sólidos peligrosos*

La contaminación del agua, la tierra y el aire es una preocupación general que ha adquirido cada vez mayores proporciones a escala mundial. Periódicamente los medios de comunicación informan de enfermedades y problemas de contaminación causados por el tratamiento y la evacuación inadecuados de productos de desecho. Esta elevada comprensión de los peligros que puede entrañar para la salud la aplicación insuficiente o inapropiada de los métodos de manipulación de desechos ha estimulado la búsqueda de soluciones eficaces para el tratamiento de los desechos. En muchos países se están analizando iniciativas de reciclado a nivel del individuo, la comunidad, la ciudad y el Estado.

Particular interés revisten dos tipos de desechos que plantean problemas: los que contienen microorganismos potencialmente infecciosos (lodo cloacal, desechos biomédicos, aguas residuales), y los contaminados con productos químicos tóxicos. Entre los tipos básicos de sistemas de irradiación que hoy se utilizan para el tratamiento de desechos, o que se están estudiando con este fin, cabe mencionar los irradiadores gamma, los haces electrónicos, los rayos ultravioleta y los rayos X.

Desde principios del decenio de 1960, los irradiadores gamma, instalados generalmente con una fuente de energía de cobalto 60 radiactivo, se han utilizado ampliamente para esterilizar los productos médicos y de consumo. El uso de dicha tecnología en la desinfección del lodo cloacal ha quedado totalmente demostrado en una planta cercana a Munich, Alemania, y para el tratamiento de los desechos de hospitales en una planta a escala normal de esterilización de desechos biomédicos situada en Arkansas, Estados Unidos de América. Actualmente se investiga su uso para degradar las sustancias tóxicas presentes en los suelos.

Asimismo, hace varios decenios que se vienen utilizando las máquinas de haces electrónicos en los procesos industriales, donde han demostrado su eficacia en la desinfección del agua potable y las aguas residuales. Esta tecnología se ha utilizado últimamente en estudios experimentales destinados a destruir los contaminantes presentes en los suelos y las mezclas de desechos industriales.

En las plantas de tratamiento de aguas residuales se ha generalizado nuevamente el empleo de los sistemas de irradiación con rayos ultravioleta en sustitución del cloro. Dichos sistemas, utilizados por primera vez hace muchos años, han experimentado mejoras que se han traducido en equipos más potentes y en un funcionamiento más fiable.

Por último, se ha investigado la posible aplicación de los rayos X —cuyo uso ha quedado bien establecido en el diagnóstico médico y la terapia del cáncer— en el tratamiento de desechos, aunque dicha tecnología todavía no ha comenzado a explotarse para esos fines.

## Actividades desarrolladas a escala mundial

Para la aplicación en gran escala del tratamiento por irradiación se suelen considerar varios tipos de fuentes de radiación. En 1992 la American Society of Civil Engineers publicó un examen sobre el estado actual de la tecnología para el tratamiento por irradiación del agua, las aguas residuales y el lodo mediante cuatro tipos de radiaciones\*. En el examen se resume el grado de perfeccionamiento que han alcanzado los cuatro tipos de tecnologías de radiación investigadas: radiaciones ultravioleta, isótopos radiactivos (principalmente el cobalto 60), aceleradores lineales o máquinas de haces electrónicos, y equipos de rayos X.

En muchos países del mundo se han construido instalaciones de irradiación para el tratamiento del agua. (Véase el cuadro de la página 12.) La primera planta en gran escala fue el irradiador gamma de

por  
J.F. Swinwood,  
T.D. Waite,  
P. Kruger y  
S.M. Rao

La Sra. Swinwood es Alta Funcionaria de Desarrollo del Mercado de la Nordion International Inc., Ontario, Canadá; el Dr. Waite es Profesor de Ingeniería Ecológica de la Universidad de Miami, Estados Unidos de América; el Dr. Kruger es Profesor de Ingeniería Civil de la Universidad de Stanford, Estados Unidos de América; y el Dr. Rao es Jefe de la División de Isótopos del Centro de Investigaciones Atómicas de Bhabha, Bombay, India.

\*Radiation Treatment of Water, Wastewater and Sludge, Task Committee on Radiation Energy Treatment, American Society of Civil Engineers, Nueva York (1992).

**Instalaciones de irradiación que se han utilizado o se están utilizando en el tratamiento del agua, las aguas residuales y el lodo**

	Tipo de irradiador	Tipo de desecho tratado	Motivo del tratamiento
Alemania	Cobalto 60	Lodo	Desinfección antes de utilizar la tierra
	Cobalto 60	Agua de pozo	Impedir la bioincrustación
Austria	Haz electrónico	Agua potable	Reducción de contaminantes químicos
	Cobalto 60	Agua potable	Reducción de fenoles
Canadá	Cobalto 60	Lodo	Desinfección antes de aplicar el fertilizante
Estados Unidos de América	Haz electrónico	Aguas residuales, lodo	Desinfección
India	Cobalto 60	Lodo	Desinfección
Japón	Cobalto 60	Lodo	Desinfección antes de preparar el abono orgánico
	Cobalto 60	Lixiviado de recubrimiento	Destrucción de productos tóxicos
Noruega	Cobalto 60	Lodo	Desinfección
	Haz electrónico	Efluente	Desinfección
República Checa	Cobalto 60	Agua potable	Desinfección
Sudáfrica	Haz electrónico	Lodo	Desinfección

Fuente: Adaptado de *Radiation Treatment of Water, Wastewater, and Sludge*, informe publicado por la American Society of Civil Engineers (1992). En la lista se incluyen instalaciones experimentales y a escala normal que han estado o están actualmente funcionando. En el informe figuran descripciones y referencias más detalladas.

Geiselbullach para el tratamiento del lodo, construido en Alemania en 1973. Otra aplicación industrial, también en Alemania, es el uso de la irradiación para reducir la bioincrustación de los pozos de agua potable. En estos momentos están funcionando varias instalaciones de haces electrónicos para investigar la viabilidad industrial del tratamiento del agua, las aguas residuales y el lodo.

#### Irradiador de lodo líquido en la India

El irradiador de investigación para la higienización del lodo (IIHL) de la India es la segunda planta de este tipo en el mundo. La instalación se puso oficialmente en servicio a principios de 1992 en la ciudad de Baroda, y forma parte del programa del Centro de Investigaciones Atómicas de Bhabha, Bombay, para la aplicación de la tecnología de las radiaciones en la esfera de la salud pública y la protección del medio ambiente. El irradiador se construyó en cooperación con el gobierno del estado de Gujarat, la Corporación Municipal de Baroda y la Universidad Maharaja Sayajirao de Baroda. El objetivo final es tratar toda la producción de lodo, de unos 110 metros cúbicos diarios, proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Gajera-wadi, y utilizar el lodo higienizado como fertilizante inocuo.

La instalación cuenta con dos circuitos de irradiación idénticos pero independientes, cada uno de ellos con un silo, una cámara de irradiación y siste-

mas de reciclado. Actualmente se explota un solo circuito a la vez. Cada cámara de irradiación tiene una capacidad máxima de carga de cobalto 60 de aproximadamente 500 kilocuries. Con una dosis de 4 kilogray (kGy), cada circuito de irradiación puede procesar hasta unos 100 a 120 metros cúbicos diarios de lodo. (*Véase el esquema de la página 13.*)

El lodo digerido o sin digerir se deposita primero en un silo, y una cantidad medida de 3 metros cúbicos se introduce por gravedad en la vasija de irradiación. El lodo se hace circular después con una bomba durante un tiempo predeterminado para impedir su sedimentación y suministrar así la dosis deseada. Al final de este proceso el lodo se vierte en un tanque de almacenamiento desde donde se bombea a los lechos de secado. Con la presente carga de cobalto 60, un tratamiento por lotes de dos a tres horas de duración permite eliminar casi por completo la carga microbiana, según haya sido el recuento inicial. Diariamente se desinfectan tres lotes.

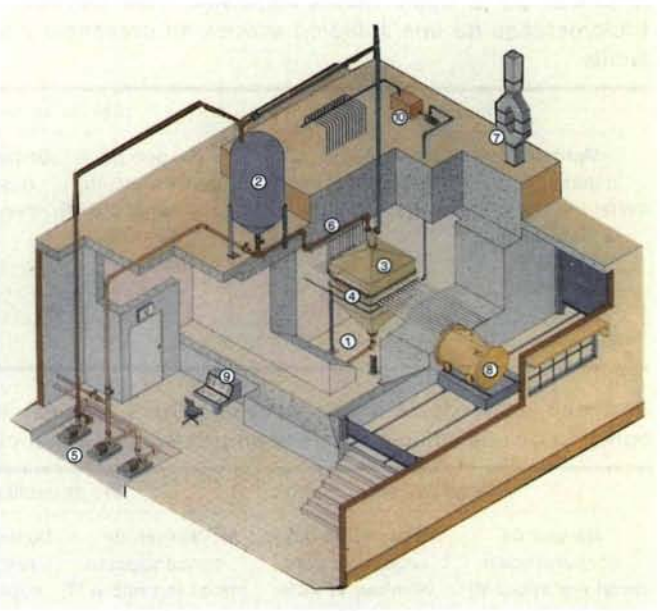
El lodo desinfectado y secado se ha utilizado como fertilizante en el huerto de la instalación del irradiador, y se están realizando esfuerzos para distribuir el lodo tratado entre los campesinos de la región.

La instalación, concebida originalmente para la higienización del lodo, se ha utilizado a efectos de evaluar la idoneidad de la tecnología para el tratamiento de los efluentes provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales. El Ministerio del Medio Ambiente de la India ha expresado interés en la tecnología de las radiaciones para el tratamiento en gran escala de los efluentes provenientes de las ciudades ubicadas a lo largo del río Ganges, en el norte de la India.

#### Destrucción de contaminantes tóxicos: Investigación en los Estados Unidos de América

En el transcurso de los últimos seis años, un equipo interdisciplinario de científicos e ingenieros ha estudiado el efecto de la irradiación por electrones de alta energía en la eliminación (destrucción definitiva) de los productos químico-orgánicos tóxicos presentes en soluciones acuosas, y los factores que se han identificado como importantes para destruir con eficacia los productos químicos. Los resultados de esos estudios son aplicables al tratamiento de desechos y a la descontaminación de los emplazamientos de desechos peligrosos. Dichos estudios se realizaron en la instalación de investigaciones con haces electrónicos (EBRF) de Miami, Florida.

La instalación está situada en la planta de tratamiento de aguas residuales del distrito central de Miami-Dade en el Cayo de Virginia, Miami, estado de la Florida, y dispone de un acelerador de electrones horizontal de 1,5 millones de electronvoltios (MeV). El acelerador es del tipo de transformador de núcleo aislado (TNA), y es capaz de suministrar una corriente de haz de hasta 50 mA, la que al variar cambia la dosis absorbida de forma lineal, y permite la experimentación con dosis de 0 a 8 kGy. El haz electrónico se lleva a una intensidad de exploración de 200 Hz para conseguir un alcance de 1,2 metros de ancho y 5 centímetros de altura.



**Arriba:** Instalación de investigaciones para la irradiación del lodo en Baroda, India. Como se muestra en el esquema, la instalación consta de la celda de irradiación 1); el silo de almacenamiento 2); la vasija de irradiación 3); el conjunto de la fuente 4); el alojamiento de la bomba 5); las líneas de recirculación 6); la salida del gas insalubre 7); el contenedor de transporte 8); la consola de control 9); y el sistema refrigerante de la fuente 10).

**Abajo:** En el Canadá se cultiva la lechuga en terrenos fertilizados con lodo irradiado en el Ontario Agricultural College como parte de las actividades de investigación. (Cortesía: Centro de Investigaciones Atómicas de Bhabha, India; Prof. Thomas Bates, Bates, Departamento de Ciencias de Recursos de la Tierra, Universidad de Guelph, Canadá.)



### Resumen de la dosis media requerida para eliminar el 99% de tricloroetileno de una solución acuosa en presencia y ausencia de arcilla

Sin arcilla		3% de arcilla	
Margen de concentración inicial (en micro-M)*	Dosis media (kGy) requerida para eliminar el 99%	Margen de concentración inicial (en micro-M)	Dosis media (kGy) requerida para eliminar el 99%
0,61-0,88	0,57	0,58-0,72	0,58
6,2-8,9	0,64	6,2-7,2	0,64
40-58	1,07	45-59	1,06

\*1 micro-M = 0,131 mg por litro

### Resumen de la dosis media necesaria para eliminar el 99% del benceno de una solución acuosa en presencia y ausencia de arcilla

Sin arcilla		3% de arcilla	
Margen de concentración inicial (en micro-M)*	Dosis media (kGy) requerida para eliminar el 99%	Margen de concentración inicial (en micro-M)	Dosis media (kGy) requerida para eliminar el 99%
1,1-2,1	0,56	1,1-1,3	0,49
17-24	0,72	16-19	0,96
23-87	2,00	25-76	1,81

\*1 micro-M = 0,078 mg por litro

A un flujo de régimen de 0,45 metros cúbicos por minuto, las corrientes influentes de la instalación se exponen al haz explorado en una corriente descendente de alrededor de 4 milímetros de espesor. Como la penetración máxima en el agua es de unos 7 milímetros para electrones de 1,5 MeV, algunos de ellos atraviesan la corriente. Por consiguiente, no toda la energía del haz se transfiere al agua. La sobre-exploración de la corriente de desechos para garantizar que sus bordes sean irradiados provoca una mayor pérdida de energía. Como resultado de ello la eficiencia de la transferencia de energía es aproximadamente del 60% al 85%. Así, a una intensidad de 50 mA (75 kW) se han registrado dosis que oscilan entre 6,5 y 8 kGy. El consumo de energía total, incluidas las bombas, los enfriadores y otros equipos auxiliares, es de unos 120 kW.

### Eliminación de productos químico-orgánicos tóxicos y peligrosos: Resumen de los resultados

Se han realizado numerosos estudios sobre productos químico-orgánicos que pueden resultar de interés para el tratamiento de suelos contaminados, la descontaminación de aguas subterráneas, el tratamiento de desechos industriales y los lixiviados de desechos peligrosos. A continuación se resumen los resultados obtenidos en relación con dos compuestos.

Los datos sobre la eficiencia de la eliminación se obtuvieron en varias dosis de irradiación, en tres concentraciones iniciales del soluto, tres pH diferentes, y en presencia y ausencia de un 3% de arcilla. Los solutos se prepararon en el laboratorio en soluciones madres concentradas o se inyectaron en

camiones cisternas mientras éstos se llenaban de agua. (Véanse los cuadros.)

Los subproductos de la reacción de todos los compuestos estudiados son de naturaleza altamente oxidada. Por ejemplo, el formaldehído y el ácido fórmico, en concentraciones expresadas en micro-M, fueron los únicos subproductos de la reacción identificados en el tricloroetileno. El compuesto padre restante fue completamente mineralizado hasta transformarse en CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y HCl.

Por tanto, se ha demostrado que la irradiación mediante haces electrónicos de alta energía resulta eficaz y eficiente para destruir productos químico-orgánicos procedentes de corrientes acuosas. Los ejemplos expuestos en el presente artículo son típicos de los productos químico-orgánicos observados en las corrientes de desechos y en los emplazamientos para la descontaminación de desechos peligrosos.

### Instalación canadiense para el reciclado del lodo: Comercialización del lodo irradiado

El lodo cloacal urbano es la materia sólida que se elimina durante los procesos de tratamiento de las aguas residuales de las plantas de tratamiento de desechos. El lodo por lo general contiene componentes potencialmente nocivos como por ejemplo, organismos infecciosos (virus, bacterias, parásitos), metales pesados, y productos químicos. También contiene nitrógeno, fósforo y otros nutrientes que favorecen el crecimiento de las plantas.

En varios países (Alemania, la India, Italia) se ha adoptado con buenos resultados el uso de los sistemas de irradiación para desinfectar los lodos líquidos antes de aplicarlos a las tierras agrícolas. En el Canadá, un programa experimental de cuatro años de duración dio por resultado la propuesta de crear una instalación para el reciclado del lodo en que se incorporase un irradiador de lodo con una fuente de cobalto 60. Si se aprueba, la instalación transformará el lodo en un producto seco de textura terrosa, listo para ser ensacado y comercializado por las firmas dedicadas a la venta de productos hortícolas.

### Sistemas de irradiación del lodo

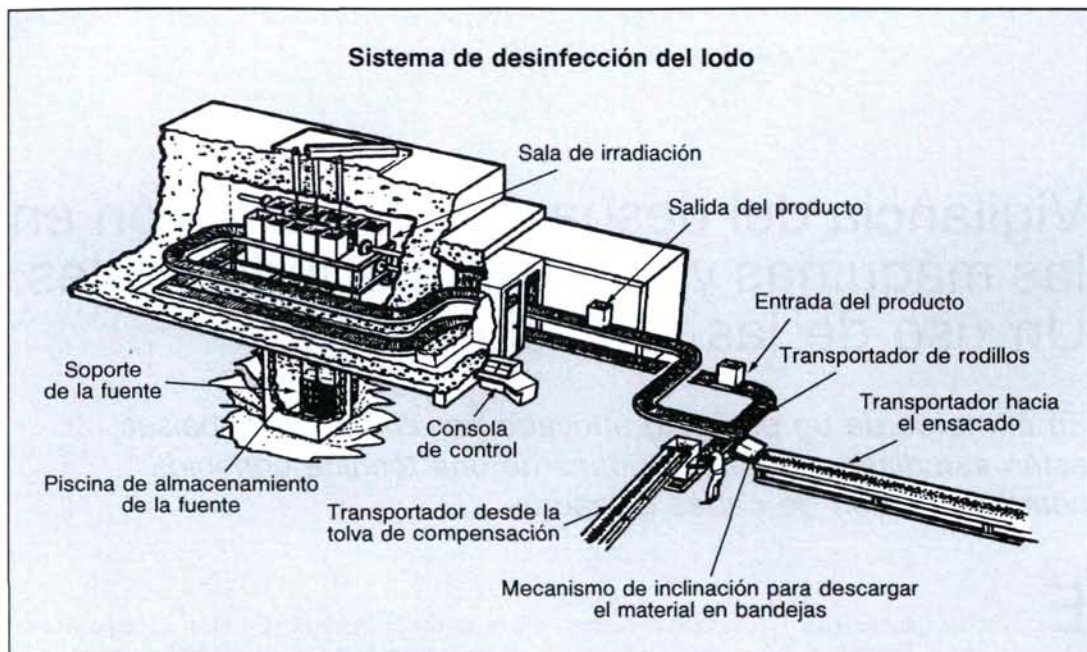
La desinfección del lodo por irradiación se realiza generalmente en un irradiador gamma con una fuente de cobalto 60. En el mundo hay más de 160 irradiadores industriales de este tipo que se explotan a escala normal para esterilizar jeringuillas, suturas, batas de cirujanos, válvulas cardíacas, ungüentos, talcos y un sinnúmero de productos médicos y de consumo.

El sistema de desinfección del lodo por irradiación consta de tres componentes principales:

- una sala de desinfección con paredes de hormigón que aloja al irradiador y el cobalto 60;
- un mecanismo de manipulación del producto que transporta el lodo hacia y desde la sala; y
- una fuente de energía de cobalto 60 para la desinfección.

Las fuentes de cobalto 60 constituyen un componente importante del irradiador. El cobalto 60 es un isótopo radiactivo producido deliberadamente, igual

### Esquema de un irradiador de lodo urbano



al que se utiliza en los hospitales para el tratamiento de los pacientes con cáncer. El cobalto 59 no radiactivo de origen natural se procesa para que adquiera la forma de varillas semejantes a un lápiz. Estos "lápices" se bombardean con neutrones en un reactor nuclear durante un año o más, período tras el cual cerca del 10% del cobalto 59 se habrá transformado en cobalto 60. Seguidamente los lápices se retiran del reactor para someterlos a un tratamiento ulterior y prepararlos para enviarlos a los usuarios de los sistemas de irradiación industrial.

El cobalto 60 emite rayos gamma cuando se desintegra en níquel. Estos rayos gamma atraviesan el lodo eliminando microorganismos y parásitos y no dejan ningún residuo en el lodo o en su superficie ni lo transforman en "radiactivo". El proceso de irradiación no alterará el contenido de humedad ni los niveles de nutrientes y de metales pesados, su única función es eliminar los organismos patógenos.

#### El lodo irradiado como fertilizante

El lodo desinfectado puede reciclarse en condiciones de seguridad para utilizarlo como fertilizante, mejorador del suelo, o como ingrediente de una amplia diversidad de fertilizantes para usos especiales. Los productos derivados del lodo compiten perfectamente con los productos destinados a mejorar los suelos y los de abono animal que suelen venderse en el mercado.

Por su base orgánica, los productos derivados del lodo ofrecen la posibilidad de mejorar a largo plazo los suelos, a diferencia de los fertilizantes químicos que, aunque proporcionan nutrientes, tienen pocas propiedades que enriquezcan los suelos. Los componentes naturales de los productos con base de lodo hacen que resulte muy conveniente su aplicación en siembras de arbustos y flores. También pueden utilizarse en céspedes nuevos o ya sembrados.

#### Retos y oportunidades para el futuro

En el presente artículo se han explicado a grandes rasgos los tipos de problemas de la gestión de desechos que pueden resolverse mediante diversas tecnologías de las radiaciones. En algunos casos será preciso realizar más actividades de investigación y experimentación antes de que la tecnología pueda utilizarse a escala industrial; en otros, la tecnología ya se está empleando o está lista para emplearse en escala normal.

Las investigaciones que se llevan a cabo actualmente en los centros científicos apuntan a las nuevas funciones que corresponderá desempeñar en el futuro para la aplicación segura, fiable y económica de las tecnologías de las radiaciones en el tratamiento de desechos. Entre estas tecnologías se cuentan las máquinas de haces electrónicos para eliminar los gases de combustión de contaminantes ambientales como el óxido de nitrógeno y el bióxido de azufre, los equipos que utilizan el cobalto 60 para esterilizar los desechos de hospitales y laboratorios para su evacuación segura, y el uso cada vez mayor de las radiaciones ultravioleta en sustitución de productos químicos que contienen cloro para desinfectar las aguas residuales.

Con cada año que transcurre aumenta para los ciudadanos de todos los países la lista de problemas ambientales aparentemente insuperables. Para encarar estos retos se está recurriendo a soluciones basadas en el uso de alta tecnología que den respuesta a los problemas actuales y futuros. La tecnología de las radiaciones proporciona una opción viable en esta búsqueda constante.