



La inertización en fase dispersa (ILFD). Nueva técnica de tratamiento de lixiviados (I)

Tecnologías para la inertización de lixiviados

En el presente artículo se presenta una nueva tecnología para la inertización de los lixiviados de vertederos, que se fundamenta en el contacto entre fases dispersas. Esta tecnología facilita el contacto entre los flujos que intervienen (lixiviados-reactivos), mejorando significativamente los procesos de transporte de calor, masa y cantidad de movimiento, los cuales favorecen el desarrollo de las reacciones que toman lugar. Esto permite minimizar los costes operativos por reducción de la cantidad de reactivos utilizados, en comparación con la inertización en masa, tecnología actual en el mercado, haciendo más atractivo desde el punto de vista económico este proceso.

Joaquín Reina Hernández
Director Energy & Waste Tech - Tec Engineering

LOS PROBLEMAS DEL MANEJO inadecuado de los residuos sólidos no sólo afectan a la salud humana, también está relacionado con la contaminación de la atmósfera, los suelos, así como las aguas, tanto superficiales como subterráneas, que muchas veces son fuentes de abastecimiento de agua potable. Estos recursos hídricos se contaminan por la afluencia de lixiviados sin tratamiento procedentes de los vertederos de residuos sólidos.

Los lixiviados constituyen la parte líquida que se filtra a través de los residuos sólidos, dispuestos en un vertedero y que extrae materiales disueltos o en suspensión. Estos a su vez están determinados por un conjunto de elementos, entre los que se encuentran la composición de los residuos sólidos, la forma de operación del vertedero y las condiciones climáticas del lugar donde se encuentra ubicado. Su composición varía según la antigüedad del vertedero, tipos de residuos depositados y la historia previa al momento de muestreo.

Por ello, los lixiviados de vertedero habrán de gestionarse de manera adecuada en función de sus características físicas, químicas y de composición. La composición de los lixiviados de un vertedero depende del tipo de vertedero (peligroso, no peligroso e inerte) y, dentro de un mismo vertedero, varía en función del tiempo de explotación del mismo. Así, de acuerdo al tiempo, se puede hablar de lixiviado joven, el que proviene de un vertedero que tiene de 1 a 2 años, y lixiviado maduro, el que proviene de uno con más de tres años de edad.

Por lo general, los lixiviados presentan altos niveles de contaminación, principalmente debidos a:

- Elevadas concentraciones de materia orgánica.
- Concentraciones de nitrógeno, principalmente en forma de amonio.
- Altas concentraciones en sales, principalmente cloruros y sulfatos.
- Baja presencia de metales pesados.

La Figura 1 muestra la distribución en % de los contaminantes mayoritarios de los lixiviados de varios depósitos controlados.

En la Tabla 1 se presentan datos representativos de las características de lixiviados en vertederos jóvenes y maduros. Como puede apreciarse, la composición química de los lixiviados varía mucho con la antigüedad del vertedero, e incluso con la historia previa al momento de muestreo.

TECNOLOGÍAS. TIPOS DE TRATAMIENTOS

El tratamiento de lixiviados es muy similar a la depuración de aguas residuales, aunque con algunas diferencias debido a su alta carga orgánica. Los aspectos económicos y técnicos marcan el tipo de tratamiento más adecuado para cada caso concreto, combinándose en muchas ocasiones varios de ellos.

En la Tabla 2 se exponen las diferentes tecnologías existentes en la actualidad para el tratamiento de los lixiviados, haciendo énfasis en el manejo de las características problemáticas de los mismos.

Figura 1. Porcentaje de los contaminantes fundamentales de un lixiviado

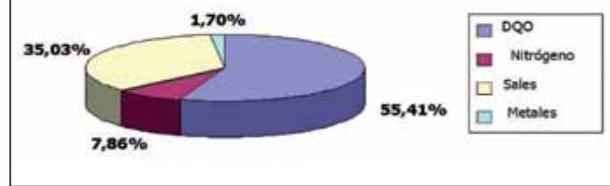


Tabla 1. Características de lixiviados según su edad

Característica	Lixiviado joven	Lixiviado viejo
DBO	Muy alto	Bajo
DQO	Muy alto	Alto
Amoníaco	Muy alto	Alto
Fósforo	Usualmente deficiente (1)	Suficiente
pH	Muy bajo	Bajo
Detergentes	Muy altos	Bajos
Sales disueltas	Muy altos	Bajas (relativamente)
Agentes incrustantes (Fe, Ca, Mg)	Muy altos	Bajos
Metales pesados	Muy altos	Bajos

(1) Deficiente desde el punto de vista de un tratamiento biológico aerobio

En la Tabla 3 se exponen las diferentes tecnologías existentes en la actualidad para el tratamiento de los lixiviados, haciendo énfasis en la complejidad tecnológica.

En la Tabla 4 se exponen las diferentes tecnologías existentes en la actualidad para el tratamiento de los lixiviados, haciendo énfasis en el rendimiento de remoción.

En la Tabla 5 se exponen las tecnologías de mayor aplicación en la actualidad para el tratamiento de los lixiviados, haciendo una comparativa de costos.

En líneas generales, las tecnologías más utilizadas usan diferentes combinaciones de técnicas/tratamientos biológicos y físico-químicos. Los caudales a tratar, la carga contaminante, así como los límites de la normativa de vertido, son los parámetros que acabarán determinando si una sola técnica puede ser suficiente, o bien habrá que recurrir a técnicas/tratamientos más completas, como un proceso de filtración mediante membranas posterior al proceso biológico. Recientemente se han introducido como técnica de tratamiento la concentración por evaporación, en sus diferentes vertientes, y el secado por aspersión.

Independientemente del tratamiento/técnica aplicada, ya sea de membrana o evaporación, se obtendrán dos fracciones: una limpia, el permeado, y otra sucia, el rechazo. En esta última fracción es en donde se concentran todas las impurezas del

agua tratada. Este rechazo o concentrado posee, por tanto, un mayor impacto ambiental que el agua que le dio origen; por ello, debe ser tratado con la finalidad de minimizar su volumen, revalorizar subproductos contenidos en él, o inertizarlo para su futuro manejo y disposición dentro de la propia instalación.

Todas estas tecnologías expuestas anteriormente podemos considerarlas como tratamiento secundarios, puesto que se dirigen a la minimización de este tipo de residuos (agua residual) y no a convertirla en un material apto para su manejo y su futura disposición.

Tabla 2. Comparativas entre tecnologías de tratamiento de lixiviados. Manejo de características problemáticas

Problemas con	Tecnología						
	Aerobio	Anaerobio	Evaporación	Recirculación	Membranas	Sistemas naturales	Tratamiento en PTAR
Formación de precipitados	++	+++	+	++	+++	+	No
Toxicidad a los microorganismos	++	++	No	No	No (1)	+	Potencial
Formación de espumas	+++	+	++	+ (1)	Variable (2)	No	Baja
Emisión de COV	+++	+	++	+	Variable (2)	No	Baja
Sensibilidad a variaciones de caudal	++	++	+	+	+	No	No
Producción y manejo de lodos	+++	+	+	No	+	No	No
Requerimientos de área	Baja	Baja	Muy baja	Baja	Baja	Alta	No

(1) Pueden formarse en los tanques de almacenamiento
 (2) Si los sistemas son aerobios, la problemática puede ser alta
 (+) Una cruz significa cómo afecta negativamente la característica al proceso en cuestión. Cuanto más cruces, más negativamente afecta

Tabla 3. Comparativas entre tecnologías de tratamiento de lixiviados. Complejidad tecnológica

Problemas con	Complejidad tecnológica						
	Aerobio	Anaerobio	Evaporación	Recirculación	Membranas	Sistemas naturales	Tratamiento en PTAR
Necesidad de insumos químicos	+++ (1)	+++ (1)	++ (2)	-	+++ (1)	-	-
Necesidad de insumos operacionales (v. gr. membranas)	++	+	+	+	+++	-	-
Necesidad de suministros de partes	++	-	+	+	+++	-	+
Suministro de energía eléctrica	+++	+ (4)	- (5)	+	+++	+ (3)	+
Complejidad operacional	+++	+	++	+	+++	-	-

(1) Requiere un extenso pretratamiento
 (2) Puede requerir pretratamiento. Algunos sistemas usan sustancias para control de pH, espumas
 (3) Puede requerir si hay necesidad de bombear el lixiviado. Usualmente no requiere
 (4) Puede requerir en el sistema de pretratamiento
 (5) Puede llegar a ser autosuficiente. Algunas tecnologías así están diseñadas

Por ello, actualmente se habla de tres tipos de tratamientos de los lixiviados de vertederos. Los primarios, dirigidos a la preparación y acondicionamiento del lixiviado para su entrada a una segunda etapa de tratamiento. Los secundarios, dirigidos a la minimización de éstos, ya sea por vía física (diferencial de presión), es decir, filtración mediante membranas, donde destaca la ósmosis inversa, o por vía térmica, como es el caso de la evaporación y secado por aspersión, o la combinación de ambos. Y los tratamientos terciarios, encargados de transformar directamente los lixiviados (previo acondicionamiento) o los concentrados procedentes de los tratamientos secundarios en un sólido inerte para su manipulación y vertido en el propio vertedero o en instalaciones preparadas para esta actividad. En esta última etapa, es decir, la de los tratamientos terciarios o tratamientos finalistas, encontramos la inertización.

DESARROLLO

Inertización. Es un proceso físico-químico que convierte a un efluente en un sólido con integridad estructural, evitando la migración de contaminantes por reducción de la movilidad de los mismos.

La inertización es una técnica utilizada ampliamente en la gestión de residuos peligrosos, que engloba dos operaciones:

La estabilización del residuo.

Se trata de un proceso que utiliza una serie de reactivos para:

- Reducir la naturaleza peligrosa del residuo.
- Minimizar la velocidad de migración de los contaminantes al medio ambiente.
- Reducir la toxicidad de sus componentes.

Comúnmente se utiliza el concepto de fijación como sinónimo de estabilización. La estabilización se realiza mediante la adición de reactivos que:

- Mejoran el manejo y las características físicas del residuo.
- Disminuyen la superficie a través de la cual puede tener lugar la transferencia o pérdida de contaminantes.
- Limita la solubilidad de cualquier contaminante presente en el residuo.
- Reduce la toxicidad de los contaminantes.

La solidificación del residuo.

Se describe como el proceso de adición de reactivos con el fin de solidificar el residuo, aumentando su resistencia y disminuyendo la compresibilidad y la permeabilidad.

En el sentido más amplio de la palabra, la inertización puede definirse como la técnica a través de la cual puede transformarse un residuo peligroso en un residuo inerte; entendiéndose por tal el residuo que no experimente transformaciones físicas, químicas, o biológicas significativas. En la práctica común se trata de conseguir un residuo que pueda ser gestionado como no peligroso.

La inertización se aplica principalmente a residuos peligrosos sólidos y pastosos de naturaleza inorgánica y, en menor medida, a los residuos orgánicos, por las siguientes razones:

- Cuando un residuo orgánico no puede ser reutilizado o reciclado, lo normal es aprovechar la energía contenida en él, utilizándolo como combustible de instalaciones especiales, como cementeras y arcilleras.
- Los compuestos orgánicos dificultan el proceso de solidificación con cemento, reactivo más utilizado para tal fin.

En los casos de los lixiviados y/o concentrados de lixiviados

Tabla 4. Comparativas entre tecnologías de tratamiento de lixiviados. Rendimiento de remoción

Problemas con	Rendimientos						
	Aerobio	Anaerobio	Evaporación	Recirculación	Membranas	Sistemas naturales	Tratamiento en PTAR
Demanda bioquímica de oxígeno	Muy altos	Altos	Muy altos	Intermedios	Muy altos	Muy altos	Muy altos
Nutrientes	Altos (1)	Muy bajos	Muy altos	Bajos	No (1)	No	Variables (4)
Metales	Intermedios (2)	Altos	Muy altos	Intermedios	Altos	Altos	Altos
Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)	Altos (3)	+	Muy altos	+	No (1)	+	Variables (5)
Patógenos	Bajos	Bajos	Muy bajos	Bajos	Muy altos	Variables (4)	Variables (4)

(1) Pueden ser altos o bajos dependiendo del diseño

(2) Cuando hay pretratamiento pueden tener remociones muy altas

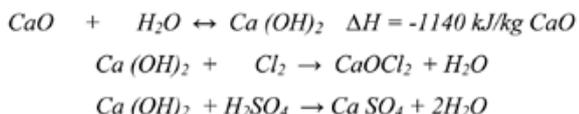
(3) La remoción se hace por arrastre en el tanque de aireación. Este genera problemas de impacto ambiental

(4) Pueden ser muy altos si así se requiere

(5) Puede generar problemas en las conducciones

R.S.U., la inertización se puede realizar añadiendo a los mismos óxidos de cal CaO y cemento -reactivos por excelencia para este fin- en un equipo mezclador.

Entre las reacciones que se desarrollan en el proceso de inertización de los lixiviados se pueden destacar:



La primera reacción es la hidratación del óxido de cal, es decir, la formación de hidróxido de calcio o cal apagada muy usual en este tipo de proceso. Esta reacción se caracteriza por ser exotérmica. El proceso de producción de cal apagada se lleva a cabo a temperatura cercana a los 150°C.

Tipos de inertización. Dado el desarrollo actual, se puede hablar de dos tipos de inertización de los lixiviados:

En masa. Mezcla de lixiviados + reactivos. (Figura 2)

Este tipo de inertización se caracteriza porque en un equipo se mezclan las fases en proporciones adecuadas de reactivos/lixiviados para la formación del inertizado. Entre los equipos más usuales se encuentran los mezcladores de tipo tambor (Figura 2, tipo reactor continuo o discontinuo de mezcla completa) o del tipo tornillo sinfín o tornillo de Arquímedes (Figura 3, reactor de flujo en pistón).

Al ser un reactor de flujo en masa, la eficacia del contacto entre las fases (sólido-líquido) está limitado por la intensidad de la agitación, por lo que, a su vez, se limitan los coeficientes de transporte de masa y calor, los cuales disminuyen considerablemente (alta resistencia al desarrollo de las reacciones), lo que conlleva a altos tiempos de residencias. Para vencer esta desventaja y otras típicas de este tipo de contacto sólido-líquido, se usa elevada cantidad de reactivo por unidad de masa del residuo (lixiviado-líquido).

Como resultado de esta reacción, se libera un gas con alta concentración en NH₃, acompañada de vapor de H₂O. Esto se debe a la alta concentración en amonio (NH₄⁺) que posee este tipo de agua (residuo), y por el desplazamiento del equilibrio, tanto químico (aumento del pH) como térmico (elevación de la temperatura), que tiene lugar, lo cual favorece la liberación del amonio (NH₄⁺) en forma de gas (NH₃).

Este gas, antes de ser vertido a la atmósfera, se lava para eliminar cualquier traza de NH₃ mediante un sistema de absorción-desorción.

La Figura 3 muestra el diagrama de flujo de este modelo tecnológico (instalación de tratamiento). En este caso se combina la osmosis inversa con la evaporación para concentrar aún más el concentrado procedente de la separación por membrana. El concentrado resultante pasa al proceso de inertización, donde con los reactivos apropiados se convierte en un producto sólido inerte listo para ser vertido en vertedero.

Tabla 5. Comparativas entre tecnologías de tratamiento de lixiviados. Comparación de costes

Tratamiento	Coste US\$/m ³
Proceso aeróbico con remoción de nitrógeno	20
Ósmosis inversa en dos etapas	7 - 10
Proceso biológico + carbón activo + precipitación	25 - 35
Proceso biológico + ósmosis inversa + evaporación del concentrado	35 - 40
Evaporación	5
Humedales	1

Consumo energético	Cantidad
Ósmosis inversa - nanotración	8,5 kWh/m ³
Evaporación al vacío	12 kWh/m ³

NOTA: Estos son los costes reportados en la literatura internacional para países desarrollados. Debe tenerse cuidado al usarlos. Se presentan como punto de referencia



Figura 2. Instalación de inertización de lixiviado en fase masa

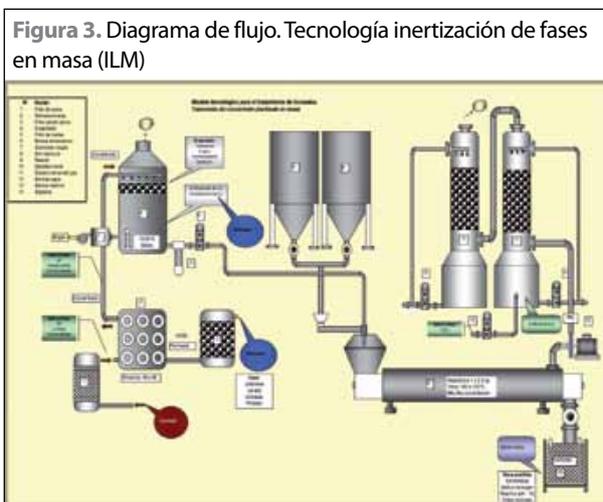


Figura 3. Diagrama de flujo. Tecnología inertización de fases en masa (ILM)

En fase dispersa. Atomización de fase líquida + pulverización de los reactivos sólidos (formación de nieblas). (Figura 4)

Este tipo de inertización se caracteriza porque, dentro de una cámara calentada, se atomiza por medio de una boquilla el lixiviado, formando pequeñas gotas, mientras que los reactivos se pulverizan a su vez en su interior. En ambos casos se forma una niebla, por un lado de gotas y por otro de partículas, que se mezclan. De esta forma se alcanza una elevada superficie de contacto, mejorando los coeficientes de transporte de masa y calor, lo cual garantiza el desarrollo de la reacción con un alto grado de eficiencia. Por ello, los requerimientos de reactivos se acercan más a la relación estequiometría de la reacción, disminuyendo de esta forma la cantidad de reactivos que se requieren para el desarrollo de las reacciones.

En esta tecnología se requiere un control adecuado de los flujos, tanto del lixiviado que se introduce como del reactivo para la inertización. Por ello se requiere un sistema de dosificación para la parte sólida.

A diferencia de la inertización en masa, ésta opera a temperaturas comprendidas entre los 150 a 200°C, por lo que se requiere un suministro de energía térmica para calentar el aire que se utiliza, por lo general, como medio de calefacción. Otras de las posibilidades es el uso de gases de escape de los motores de generación a biogás, con el cual cuentan generalmente los vertederos.

Este gas, a su vez, tiene la función de transportador neumático, pues transporta el inertizado, en forma de polvo, desde la cámara de reacción hasta el sistema de separación de partículas, donde por diversos sistemas puede ser separado (ciclón-filtros de mangas) y recogido para su futuro manejo y disposición.

Al igual que en el proceso en masa, como resultado de esta reacción se libera un gas que contiene NH_3 , acompañada de vapor de H_2O . Pero en este caso sus concentraciones son bajas, debido a que se encuentra diluido en el agente calefactor, por lo general aire.

Al igual que en proceso en masa, este gas, antes de ser vertido a la atmósfera, se lava para eliminar cualquier traza de NH_3 y otros posibles contaminantes, como los COVs.

La Figura 5 muestra el modelo tecnológico de este tipo de instalación. En este caso se combina la ósmosis inversa con la evaporación, para concentrar aún más el concentrado procedente de la operación de membrana. El concentrado resultante pasa al proceso de inertización, donde con los reactivos apropiados se convierte en un producto sólido inerte listo para ser vertido en vertedero.

La Tabla 6 muestra una comparativa entre las actuales tecnologías para la inertización de los lixiviados procedentes de vertederos.

Otro de los aspectos que hace atractiva la inertización en fase dispersa es que puede usar como medio calefactor gases de escape de motores de combustión. Esta opción, además de abaratar costes desde el punto de vista energético, permite presentar un nuevo modelo de gestión de

La inertización en fase dispersa constituye una nueva tecnología para la inertización de los lixiviados de vertederos y aguas complejas. Esta reduce los costes operativos por menor consumo de reactivos



Figura 4. Instalación de inertización de lixiviado en fase dispersa

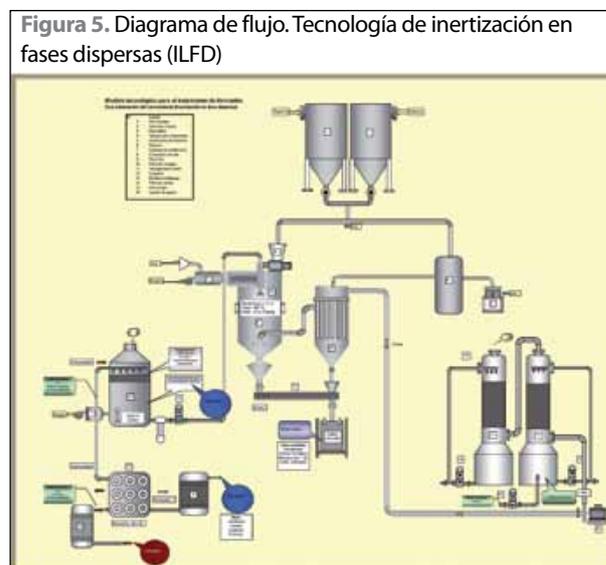


Figura 5. Diagrama de flujo. Tecnología de inertización en fases dispersas (ILFD)

Tabla 6. Comparativas entre las tecnologías de inertización

	Inversión	Consumo reactivo	Consumo energía eléctrica	Consumo energía térmica	Costes operativos
ILM	Baja	2 a 3 kg _{react} / kg _{lix}	Alto	No	Altos
ILFD	Alta	0,75 a 1,2 kg _{react} / kg _{lix} (2)	Bajo	Alto (1)	Bajos

(1) Se suele utilizar biogás o el calor de gases de escape de motores. Estas fuentes de energía posibilitan la reducción de costes, y a su vez, una menor contaminación de la atmósfera.
(2) Depende de la procedencia del lixiviado

los efluentes de los vertederos, que será presentado en la segunda parte de este artículo.

CONCLUSIONES

La inertización en fase dispersa constituye una nueva tecnología para la inertización de los lixiviados de vertederos y aguas compleja. Asimismo, facilita la reducción de los costes operativos.

La inertización en fase dispersa (ILFD) facilita el contacto entre fases, con lo que favorece el desarrollo de las reacciones; favoreciendo a su vez una mayor eficacia del proceso de inertización.

Bibliografía

[1] Bódalo, A., Hidalgo, A. M., Gómez, M., Murcia, M.D. y Marín, V. 2007. "Tecnologías de tratamiento de lixiviados de vertedero (I) Tratamientos convencionales". Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Murcia. Ingeniería Química. 142-149.

[2] Giraldo, E. "Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: avances recientes." Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes. 44-55.

[3] García, J., Ferrer, C., Moliner, F., Donato, J., Albarrán, F. 2008. "Tratamiento de lixiviados de vertedero de RSU mediante proceso combinado de ultrafiltración y ósmosis inversa. Retema. 20-29.

[4] Pellón, A., López, M., Espinosa, M^a del C., Escobedo, R. 2009. "Tecnología para el tratamiento de lixiviados provenientes de vertederos de residuos sólidos urbanos". Tecnología Química. Cuba. 113-120.

[5] Pérez, D. 2010. "Inertización de Residuos Industriales". Máster en Ingeniería y Gestión Medioambiental Universidad de Castilla-La Mancha.

[6] Reina, J. 2002. "Spray drying for concentrated treatment. Proceeding". 9^o Congreso Mediterráneo de Ingeniería Química. Barcelona. Spain

[7] Reina, J. 2007. "El secado por aspersión. Una alternativa para el tratamiento de los concentrados procedentes de planta de ósmosis inversa". Retema. 66-70.

[8] Reina, J. 2010. "Modelos tecnológicos en el tratamiento de lixiviados". XI Conferencia Ategrus sobre vertederos controlados. Municipalia. Feria de Lleida.

[9] Reina, J. 2013. "Inertización en fase dispersa (ILFD). Nueva tecnología para el tratamiento de los lixiviados de vertederos". XIV Conferencia Ategrus sobre vertederos controlado. Municipalia. Feria de Lleida.

[10] Science report Improved definition of leachate term from landfills , Environment Agency, Science Report P1-494/SR1

