

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL DE LAS BALSAS QUE CONTIENEN LÍQUIDOS PELIGROSOS

Francisco J. Colomer

Antonio Gallardo

M^a Dolores Bovea

Universitat Jaume I

Abstract

In this paper, a methodology for assessing the environmental risk of earth dams for toxic liquids is showed. The development of this methodology has been made according to the following procedure:

(A) By means of a survey to experts, a study and identification of morphologic and geotechnic characteristics of the dams is made. They empathized that the parameters to be considered are: (1) geotechnical stability of the slope, (2) potential erosion of the downstream slope, (3) waterproofing system in the dam, (4) overtopping probability, (5) volume of liquid stored and (6) pollutant charge of the liquid.

(B) Due to the fact that these parameters are measured in different units, they have to be homogeneized. For this purpose, a panel of experts is required to draw the rating curves which relate the parameters with environmental risk units.

(C) Every measured parameter is combined together in order to make a function which provides a risk value.

If the risk value surpasses a level, it would involve that the environmental risk would not be acceptable and, therefore, preventive or protecting measures should be applied in order to minimize this value.

Keywords: *Toxic liquid, environmental risk, earth dam, rating curve, pollutant charge.*

Resumen

En este trabajo se presenta una metodología para cuantificar el riesgo ambiental de las balsas de materiales sueltos que almacenan líquidos peligrosos. El desarrollo de esta metodología se ha realizado según el siguiente procedimiento:

(A) Estudio e identificación de las características morfológicas y geotécnicas de las balsas a partir de consulta a expertos, los cuales destacaron que los parámetros a considerar son: (1) estabilidad geotécnica de los taludes, (2) erosión potencial de los taludes exteriores, (3) tipo de impermeabilización del vaso, (4) probabilidad de rebosamiento, (5) volumen de líquido almacenado y (6) poder contaminante del líquido.

(B) Puesto que la cuantificación de estos parámetros se hace en unidades inconmensurables entre sí, deben homogeneizarse para poder trabajar en conjunto con ellas. Para ello, se solicita a un panel de expertos que elabore funciones de transformación que relacionen el riesgo de la balsa con el parámetro correspondiente.

(C) Todos los parámetros, medidos ahora en unidades conmensurables, se combinan para desarrollar una función que proporcione un valor del riesgo.

Si el dato obtenido del riesgo supera un determinado valor podría implicar que el riesgo ambiental de la balsa no sería asumible y por tanto serían necesarias medidas preventivas o protectoras para disminuir este valor.

Palabras clave: *balsa de lixiviados, riesgo ambiental, daño ambiental, características constructivas de la balsa, carga contaminante del lixiviado.*

1. Introducción

Los líquidos lixiviados procedentes de diversos orígenes como vertederos, plantas de compostaje, estaciones depuradoras de aguas residuales, etc., suelen almacenarse en balsas o depósitos de mayor o menor capacidad a la espera de su tratamiento o depuración. Un porcentaje importante de estas balsas se han construido con materiales sueltos e impermeabilizadas con una geomembrana.

Los líquidos almacenados en estas balsas están compuestos de sustancias más o menos contaminantes incluyendo sustancias químicas orgánicas e inorgánicas y metales pesados (Colomer, 2006; Dopazo, 2002; US EPA, 1995). En efecto, los lixiviados pueden ser la causa fundamental de la contaminación en aguas superficiales y subterráneas (US EPA, 1997; Suter, 2001; Suter, 2005; OMS, 2001)

Si por alguna causa intrínseca o extrínseca a la instalación la balsa se rompe, el líquido contenido en su interior se vertería al exterior siguiendo la línea de máxima pendiente, que suele ser el cauce de un río o rambla, lo cual provocaría un considerable impacto ambiental. Por tanto, en vista del riesgo implícito de estas balsas, se deberán tomar las oportunas medidas preventivas para minimizar el riesgo de rotura.

Según los resultados proporcionados por los trabajos de Colomer (2006) a partir de un estudio mediante ortofotografía en España, fueron identificadas las balsas que contienen líquidos peligrosos, fundamentalmente lixiviados. Los resultados de esta observación mostraron que el 20% de estas balsas están situadas a menos de 2.000 m de un río, lago o curso de agua. Así pues, si una de estas balsas se rompe, el líquido contaminante vertido avanzaría aguas abajo hasta alcanzar estos cursos o masas de agua. Además, en el área afectada por la inundación de líquidos peligrosos, podrían existir diversos factores ambientales vulnerables que podrían resultar afectados negativamente por los lixiviados. Por lo tanto, se considera necesario valorar tanto el riesgo ambiental de la balsa como el impacto potencial asociado.

Como norma general, para determinar y cuantificar el riesgo ambiental se ha de considerar la probabilidad de ocurrencia de un suceso accidental (en el caso de las balsas este suceso sería la rotura del talud) y la gravedad de las consecuencias ocasionadas (AENOR, 2008). En función de esto, se han desarrollado diversas metodologías para valorar el riesgo ambiental. Entre ellas se encuentra la de la U.S. EPA (1995 y 1997), la de la Organización Mundial de la Salud (Suter et al., 2001; Suter, 2005; OMS, 2001), la de la Agencia de Investigación en la Protección del Ambiente neocelandesa (LCR, 2003) o la Agencia Española de Normalización y Certificación (AENOR, 2008; PERM, 2005).

Por otra parte, existen otras metodologías específicas basadas en modelos que determinan migraciones de líquidos o gases desde una fuente hacia los receptores a través de diversas vías (Attemborough et al., 2002; Blumberga y Thunvic, 2001; Bradley, 1980; Butt y Oduyemi, 2003; Calvo et al., 2005; Calvo et al., 2002; Golder Associates, 2002; Mavropoulos, 2004; MFE, 2004; Rapti-Caputo et al., 2006; SEPA, 2006). El inconveniente de estos modelos radica en que a medida que necesitan una gran cantidad de datos para que los resultados sean fiables. Sin embargo, en la mayor parte de los casos estos datos no están disponibles, por lo que los resultados finales pierden rigor y exactitud.

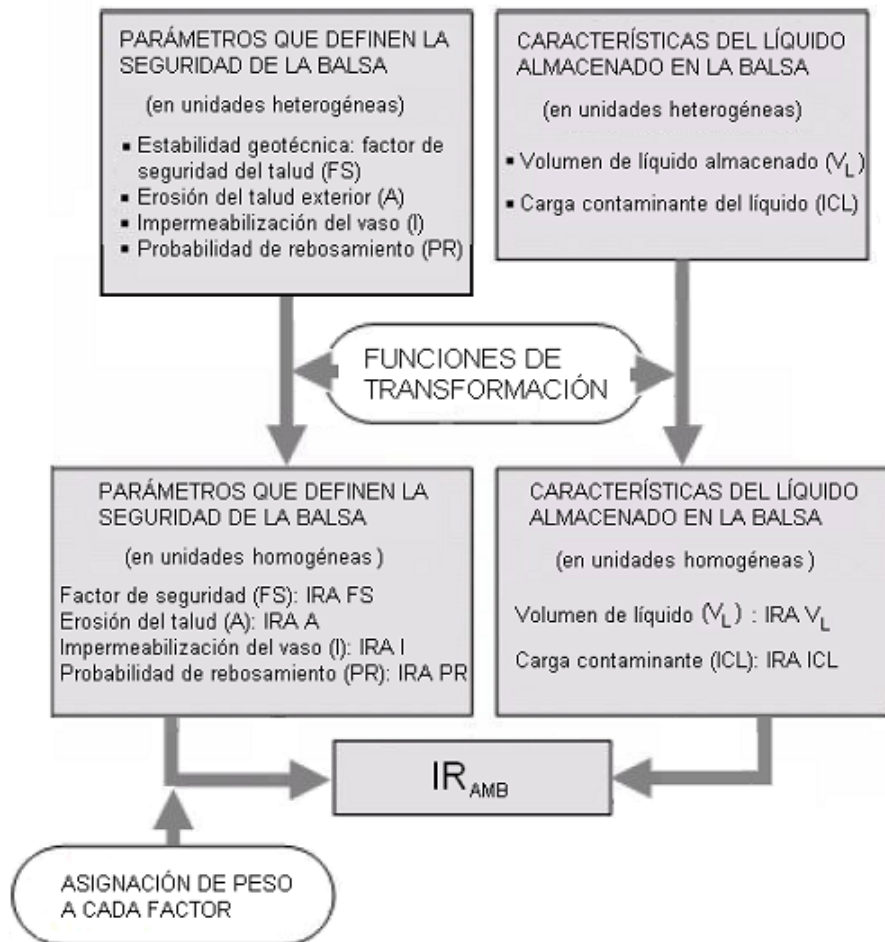
Los programas informáticos existentes valoran el riesgo intrínseco referente a los lixiviados o al biogás como fuente de contaminación, sin embargo no consideran el riesgo inherente al almacenamiento de estos líquidos.

Atendiendo a las carencias observadas en los métodos de evaluación de riesgo ambiental, en este trabajo se plantea la necesidad de obtener una metodología específica de evaluación del riesgo ambiental específico para balsas de líquidos peligrosos si tener que obtener datos complicados ni escenarios ambiguos.

2. Descripción del modelo propuesto

La metodología desarrollada para el cálculo del Índice de Riesgo Ambiental de una balsa de materiales sueltos que contenga líquidos peligrosos se resume en la figura 1.

Figura 1: Esquema de la metodología general de elaboración del índice de riesgo ambiental: IR_{AMB}



Para desarrollar la metodología de evaluación del riesgo ambiental en las balsas que contienen líquidos peligrosos se propone la creación de un índice de riesgo basado en los parámetros que definen la seguridad de la balsa. Estos valores son: [1] estabilidad geotécnica de los taludes exteriores de la balsa, [2] erosión potencial del talud exterior, [3] tipo de impermeabilización del vaso y [4] probabilidad de rebosamiento debido a lluvias intensas. Desde un punto de vista ambiental, los parámetros que tienen influencia en el riesgo son el volumen de líquido almacenado y la carga contaminante del líquido.

Los valores de estos parámetros se miden en unidades distintas por lo que, cuando el valor de estos parámetros esté calculado, deberán ser transformados en unidades homogéneas. Para ello se ha recurrido a un panel de expertos para que representen la función de transformación de cada uno de los parámetros. De estas funciones se muestra el resultado promedio que relaciona las unidades heterogéneas de cada parámetro con unidades de riesgo ambiental. Por otro lado, al panel de expertos se le pidió también que le dieran una ponderación a cada uno de los cuatro parámetros en función del peso de cada uno en el riesgo ambiental.

3. Parámetros que definen la seguridad de la balsa

Un porcentaje importante de las balsas de líquidos peligrosos existentes en España están construidas con materiales sueltos e impermeabilizadas con una geomembrana (Colomer, 2006). Los parámetros que definen que definen la seguridad de la balsa se detallan a continuación (Figura 2).

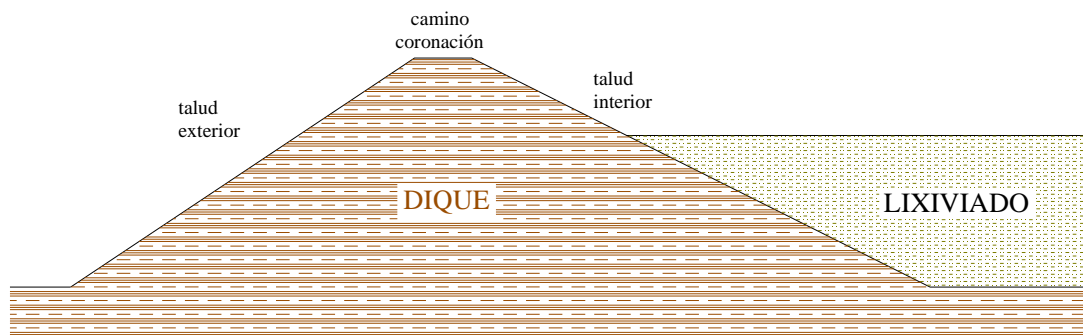
Figura 2: balsas de lixiviados con talud interior, talud exterior, impermeabilización y obras complementarias (tubería de entrada de HPDE, escalera de salvamento, vallado perimetral y anclaje de la tubería).



3.1. Estabilidad geotécnica de los taludes exteriores (FS)

La estabilidad geotécnica de un talud de materiales sueltos se define mediante su Factor de Seguridad (FS). Para el cálculo del FS se pueden utilizar diversos métodos analíticos (Taylor, 1948; Bishop y Morgenstern, 1960; Morgenstern, 1963; Janbu, 1967; Spencer, 1967; Terzaghi y Peck, 1967; Hunter y Schuster, 1968), programas informáticos o ábacos (Colomer et al., 2009). Para cualquier método que se elija es necesario conocer los siguientes factores (Figura 3):

Figura 3: representación gráfica del dique de una balsa de materiales sueltos impermeabilizada con geomembrana que contiene lixiviados.



- Propiedades geométricas del dique de la balsa: altura del talud interior y exterior, anchura del camino de coronación y profundidad del vaso.
- Propiedades mecánicas del material de construcción del dique: (cohesión efectiva C' , ángulo de rozamiento efectivo ϕ' y densidad ρ).
- Coeficiente sísmico de la zona

Atendiendo a diferentes trabajos realizados con respecto de la estabilidad de taludes para balsas de materiales sueltos, un talud puede considerarse estable si su FS es superior a 1,0 – 2,0 (Bureau of Reclamation, 1980; USDA, 1985; Lambe y Withman, 1990; DEQ, 1998) aunque un valor de $FS > 1,4$ está aceptado ampliamente.

3.2. Erosión potencial del talud exterior

Para calcular la pérdida de suelo debida a la erosión se ha aplicado la Ecuación Universal para la Pérdida de Suelo (Wischmeier y Smith, 1978)

$$A \text{ (t/ha}\cdot\text{año)} = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

En la cual:

R: factor de lluvia ($J \cdot \text{cm}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)

K: factor de erosionabilidad del suelo ($\text{t} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}/\text{ha} \cdot \text{J} \cdot \text{cm}$)

L: factor de longitud de la pendiente (adimensional)

S: factor de pendiente (adimensional)

C: factor de vegetación (adimensional)

P: factor de prácticas de conservación del suelo (adimensional)

3.3. Impermeabilización del vaso

Aunque en la legislación española no existe una norma específica en cuanto a la impermeabilización de balsas que contengan líquidos peligrosos, se puede asimilar el vaso de una balsa al de un vertedero, lo cual implica impermeabilizar con una capa de arcilla y una geomembrana. El coeficiente de permeabilidad resultante debe ser inferior a 10^{-9} m/s que es el límite de permeabilidad para vertederos de residuos peligrosos según el Real Decreto 1481/2001.

En función del tipo de impermeabilización (I) instalado en el vaso de la balsa, en esta metodología se han definido cuatro niveles con una valoración de 1 a 4, siendo I = 1 la peor solución y I = 4 la mejor. Los niveles son:

I = 1 balsa sin impermeabilización. Líquido vertido en una excavación sobre el terreno.

I = 2 balsa impermeabilizada con capa de arcilla de baja permeabilidad compactada.

I = 3 balsa impermeabilizada con capa de arcilla y geomembrana

I = 4 balsa impermeabilizada con capa de arcilla, capa de drenaje y geomembrana.

3.4. Probabilidad de rebosamiento

Para calcular la probabilidad de rebosamiento (PR) debido a lluvias intensas hay que obtener en primer lugar, datos meteorológicos en cuanto a las máximas precipitaciones caídas en 24 horas. En segundo lugar, se debe conocer la diferencia entre la capacidad máxima de la balsa y el volumen medio contenido (resguardo de la balsa). En tercer lugar es necesario determinar la superficie de escorrentía que desaguaría en la balsa en caso de precipitación. Mediante estos datos aplicados en la

distribución estadística de Gumbel se determina la probabilidad de que a causa de precipitaciones intensas, la balsa rebose, calculando este dato para un periodo de retorno de 100 años.

3.5. Volumen de líquido almacenado en la balsa V_L (m^3)

El impacto ambiental generado por el líquido peligroso es directamente proporcional al volumen vertido. Para proporcionar este dato se debe obtener el valor promedio máximo de volumen almacenado en la balsa.

3.6. Carga contaminante del líquido (ICL)

Para calcular este dato se ha seguido la metodología descrita por Kumar y Alappat (2005). Aplicando esta metodología se puede calcular el índice contaminante del líquido (ICL) a partir de la cantidad de compuestos orgánicos, compuestos inorgánicos y metales pesados.

4. Funciones de transformación

En función del cálculo realizado en el epígrafe 3, el siguiente paso consiste en elaborar las funciones de transformación que relacionan cada una de las características constructivas de la balsa, en sus correspondientes unidades, con el riesgo ambiental, en unidades de riesgo ambiental. Así pues, el FS no tiene unidades, la erosión se mide en t/ha-año, el tipo de impermeabilización sin unidades, la probabilidad de rebosamiento medido en %, el volumen de líquido almacenado en m^3 y el índice contaminante del líquido en %. Una vez elaboradas y aplicadas las funciones de transformación, todos los parámetros se medirán en unidades de riesgo ambiental y sus valores estarán dentro del intervalo [0, 1].

Para elaborar las funciones de transformación se ha recurrido a un panel de expertos, al que se le ha pedido que dibujen cómo evoluciona el riesgo ambiental en función del parámetro. Este panel de expertos estuvo compuesto por técnicos, investigadores, expertos en diseño, construcción, mantenimiento y explotación de este tipo de balsas. Se envió un total de 243 encuestas de las cuales se recibieron correctamente contestadas un total de 93 (Figura 3)

Con los datos obtenidos se realizó un análisis estadístico para resolver si los resultados eran estadísticamente significativos y si podían influir en el riesgo ambiental. Para ello se aplicó el programa informático Statgraphics Plus 5.1.

Para los factores analizados se consiguió un coeficiente de correlación entre 0,79 y 0,95. El p-value en el ANOVA fue inferior a 0,01 en todos los casos, lo cual demuestra una relación estadísticamente significativa entre las variables. Las ecuaciones lineales de las funciones de transformación proporcionadas por el programa informático fueron:

$$\text{Factor de seguridad del talud exterior} \quad IRA_{FS} = 0,9522 - 0,3680 \cdot FS \quad (2)$$

$$\text{Erosión talud exterior} \quad IRA_A = 0,0597 + 0,0087 \cdot A \quad (3)$$

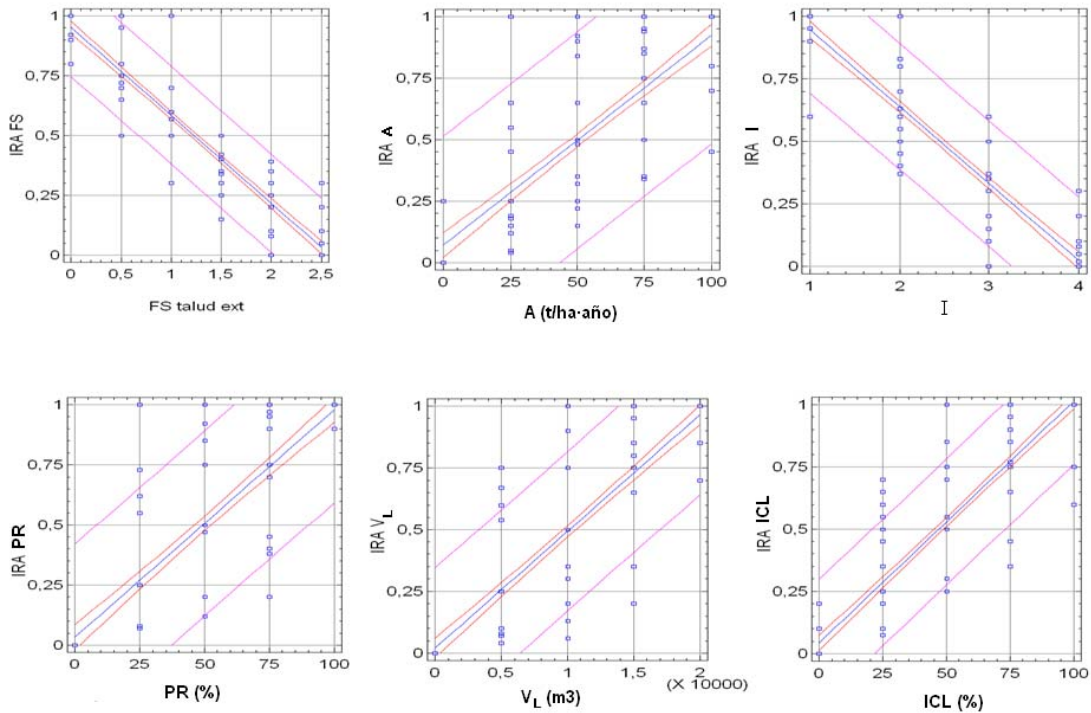
$$\text{Impermeabilización del vaso} \quad IRA_I = 1,2537 - 0,3076 \cdot I \quad (4)$$

$$\text{Probabilidad de rebosamiento} \quad IRA_{PR} = 0,0336 + 0,0095 \cdot PR \quad (5)$$

$$\text{Volumen de líquido contenido} \quad IRA_{V_L} = 0,0210 + 0,00004 \cdot V_L \quad (6)$$

$$\text{Carga contaminante del lixiviado} \quad IRA_{ICL} = 0,0436 + 0,0097 \cdot ICL \quad (7)$$

Figura 3: representación de las funciones de transformación lineales obtenidas del Statgraphics 5.1



5. Ponderación de los factores

Una vez obtenidos los resultados de las funciones de transformación elaboradas a partir de la consulta a expertos, se repite esta consulta para que los técnicos y expertos en balsas de tierra, asignen un peso relativo con un valor de 1 a 5, de menor a mayor importancia, a cada uno de los factores que definen el riesgo ambiental de las balsas que contienen líquidos peligrosos. Se enviaron 243 consultas a técnicos, investigadores, expertos en diseño, construcción, mantenimiento y explotación de este tipo de balsas. De ellas, se recibieron 99 encuestas correctamente cumplimentadas. En la tabla 1 se representa la media de los valores obtenidos (\bar{x}_i), la desviación típica (s) y el coeficiente de variación (CV). Para calcular el índice de ponderación de cada factor de seguridad se calcula la suma aritmética de los valores de importancia obtenidos en las encuestas.

Tabla 1: resultados obtenidos de la consulta al panel de expertos

Parámetro de seguridad de la balsa	(\bar{x}_i)	s	CV (%)	Índice de ponderación (IP)
IRA FS: Factor de seguridad	3,824	1,143	30	0,260
IRA A: Erosión del talud	3,167	1,505	48	0,214
IRA I: Impermeabilización del vaso	4,556	0,634	14	0,308
IRA PR: probabilidad de rebosamiento	3,222	1,176	36	0,218
Total ($\sum_{i=1}^4 \bar{x}_i$)	14,769			1,000

Una vez calculada la media aritmética de cada factor, mediante la expresión $\sum_{i=1}^4 \bar{x}_i$ se calcula la suma de todos ellos. A continuación, para obtener el índice de ponderación (IP) el valor de cada factor (\bar{x}_i) se divide entre la suma de todos, mediante la ecuación 7. De esta forma, la suma de todos los índices de ponderación tiene como resultado la unidad $\sum_{i=1}^4 IP_i = 1$

$$IP_i = \frac{\bar{x}_i}{\sum_{i=1}^4 \bar{x}_i} \quad (8)$$

6. Ecuación del riesgo ambiental generado

El Índice de Riesgo Ambiental (IR_{AMB}) generado será, así pues, una función de todos los factores descritos en el apartado 3 con los índices de ponderación calculados en el apartado 5. Los valores de los cuatro factores de seguridad de La balsa (IRA FS, IRA A, IRA I, IRA PR) se multiplican por su índice de ponderación ya que cada uno de ellos es independiente de los demás. Los cuatro sumandos anteriores se multiplican por IRA_{V_L} y por IRA_{ICL} para obtener la ecuación final del IR_{AMB} .

$$IR_{AMB} = (0,260*IRA_{FS} + 0,214*IRA_A + 0,308*IRA_I + 0,218*IRA_{PR}) * IRA_{V_L} * IRA_{ICL} \quad (9)$$

Los valores de IR_{AMB} se encontrarán siempre incluidos en el intervalo [0 , 1] de forma que cuanto mayor sea el valor, más elevado será el riesgo ambiental de la balsa.

7. Aplicaciones a casos reales

La metodología descrita en esta comunicación ha sido aplicada a cinco diferentes balsas pertenecientes a balsas de lixiviados de cinco instalaciones de la Comunidad Valenciana, Murcia y Castilla – La Mancha. Dos de ellas son balsas que recogen los lixiviados generados en vertederos de rechazos, una de una planta de compostaje, una de un vertedero de rechazos y una de un vertedero de residuos peligrosos. Los datos obtenidos de cada balsa medidos en sus unidades correspondientes se resumen en la tabla 2.

Tabla 2: Valores de los factores que definen en riesgo ambiental en cinco balsas diferentes que contienen líquidos peligrosos, en sus correspondientes unidades

	FS	A (t/ha·año)	I	PR (%)	V_L (m ³)	ICL (%)
Vertedero de rechazos (a)	2,51	26,03	3	0,22	13.600	29,386
Planta de compostaje	2,55	165,4	3	7,55	22.000	28,703
Vertedero de residuos no peligrosos	2,08	438,7	3	0,98	14.000	37,316
Vertedero de residuos peligrosos	2,88	33,34	4	1,25	15.000	68,351
Vertedero de rechazos (b)	1,41	45,3	3	11,21	9.000	31,661

A continuación, en la tabla 3, se aplican las ecuaciones lineales de las funciones de transformación del apartado 4 que homogeneizan las unidades en unidades de riesgo ambiental.

Tabla 3: valores de los factores que definen el riesgo ambiental en unidades homogéneas de riesgo ambiental.

	IRA FS	IRA A	IRA I	IRA PR	IRA VL	IRA ICL
Vertedero de rechazos (a)	0,029	0,286	0,331	0,036	0,565	0,329
Planta de compostaje	0,014	1,000	0,331	0,105	0,901	0,322
Vertedero de residuos no peligrosos	0,187	1,000	0,331	0,043	0,581	0,406
Vertedero de residuos peligrosos	0,000	0,350	0,023	0,045	0,621	0,707
Vertedero de rechazos (b)	0,433	0,454	0,331	0,140	0,381	0,351

En la Tabla 4 se resuelve la ecuación 8 y se muestra el IR_{AMB} de cada una de las balsas estudiadas.

Tabla 4: valor del IR_{AMB} de cada una de las cinco balsas analizadas

	IR_{AMB}
Vertedero de rechazos (a)	0,03
Planta de compostaje	0,10
Vertedero de residuos no peligrosos	0,09
Vertedero de residuos peligrosos	0,04
Vertedero de rechazos (b)	0,05

Los cinco casos representan balsas construidas con materiales sueltos que se encuentran actualmente en explotación. En los cinco casos el valor del IR_{AMB} es igual o inferior a 0,1. Es de destacar que ninguna de las cinco balsas ha tenido ningún tipo de problema en cuanto a su estabilidad, por lo que están consideradas como instalaciones seguras, lo que ratifica el valor obtenido de riesgo.

8. Conclusiones

La seguridad de una balsa de materiales sueltos que contiene líquidos peligrosos depende de los distintos factores que definen su estructura. Las unidades en que se mide cada uno de estos factores son heterogéneas o inconmensurables. Así pues, es necesario homogeneizar dichas unidades mediante funciones de transformación, de manera que después de aplicarlas se obtengan unidades conmensurables de riesgo ambiental. Como no todos los parámetros tienen el mismo peso dentro de la seguridad ambiental a cada factor se le ha asignado un índice de ponderación.

Los distintos factores, medidos en unidades homogéneas, se han combinado entre sí y se ha elaborado la ecuación del índice de riesgo ambiental (IR_{AMB}). Esta ecuación

representa la suma de cada factor multiplicado por su índice de ponderación. De este modo, el riesgo ambiental de una balsa de líquidos peligrosos es directamente proporcional al riesgo generado por el volumen de líquido almacenado y por la carga contaminante del líquido. Por lo tanto, IRA_{VL} y IRA_{ICL} tiene que ser multiplicados por el sumatorio anterior.

De la ecuación elaborada puede observarse que si la balsa almacena agua para riego el IRA_{ICL} sería nulo, por tanto el IRA_{AMB} también tendría un valor igual a cero. Esto no es completamente cierto ya que si una balsa para riego se rompe la avalancha de agua podría provocar un importante daño ambiental. Sin embargo, este tipo de balsa que almacena agua para riego suele contener un volumen de agua muy superior al considerado en este estudio y por lo tanto, el riesgo generado por una avalancha potencial no es tenido en cuenta y el riesgo ambiental se limita al generado por líquidos peligrosos.

En los cinco casos analizados en esta comunicación, la metodología se ha validado y obteniéndose un valor del IRA_{AMB} para cada una. Así pues, se podría decir que valores del IRA_{AMB} por debajo de los obtenidos implican una instalación segura. En consecuencia si esta ecuación se aplica y se obtiene un valor por debajo de 0,10 podría decirse que la balsa es segura.

En definitiva, el IRA_{AMB} es una herramienta que, aunque se puede aplicar en balsas ya construidas, tiene su principal objetivo en las futuras balsas ya que si en el proyecto de una balsa de materiales sueltos se aplica la ecuación y se obtiene un valor elevado, implicará que el riesgo puede ser alto, por lo que se tendrá que modificar el diseño o las características constructivas de la balsa.

9. Referencias

- AENOR. (2008) Análisis y evaluación del riesgo medioambiental. Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid. UNE 150008, 1-33.
- Attenborough G., Hall D., Gregory R. G., McGoochan L., (2002) Development of a landfill gas risk assessment model: Gassim. <http://www.lqm.co.uk/free/GasSim%20SWANA%202002.pdf>
- Bishop A.W.; Morgenstern, N.R. (1960) Stability Coefficients for Earth Slopes, Geotechnique, Institution of Civil Engineers, London, 10 129-150
- Blumberga M., Thunvik R., (2001) Thesis: Risk Assessment of the Skede landfill in Liepaja, Latvia. Stockholm. 2001. http://www.lwr.kth.se/Publikationer/PDF_Files/AMOV_EX_2001_4.pdf
- Bradley J. (1980) Guidance on assessment of risk from landfill sites. Environment Agency. Bristol. Bureau of Reclamation, 1980. Manual de Tierras. Ed. Bellisco. Madrid.
- Bureau of Reclamation (1980) Manual de Tierras. Ed. Bellisco. Madrid.
- Butt, T. E.; Oduyemi K. O. K., (2003) A holistic approach to Concentration Assessment of hazards in the risk assessment of landfill leachate. Environment International, 28, 597-608.
- Calvo F., Moreno B., Zamorano M., Szanto M. (2005) Environmental diagnosis methodology for municipal waste landfills. *Waste Management*, 25, 768-779.
- Calvo F., Zamorano M., Moreno B., (2002) Metodología de diagnóstico ambiental de vertederos como herramienta en la planificación ambiental. Colegio de Ing. de C.,C. y P. Madrid. 965-975.
- Colomer F. J. (2006) Thesis: Análisis y sistematización de la seguridad medioambiental de los vertederos de residuos urbanos y asimilables. Aplicación a las balsas de lixiviados. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia.

- Colomer F.J., Ferrer, A., Gallardo, A., Bovea, M.D. (2009) Safety factor nomograms for homogeneous earth dams less than ten meters high, *Engineering Geology*, 105, 231-238.
- DEQ Land Quality (1998), Solid Waste Landfill Guidance Document. Department of Environmental Quality, DEQ. 750 Front Street NE, Suite 120 Salem, OR 97310. <http://www.deq.state.or.us/lq/sw/disposal/landfillguidance.htm>
- Dopazo, P. (2002) Coordinación y gerencia de riesgos ambientales (responsabilidad civil por daños ambientales y seguro ambiental). *Observatorio Medioambiental*, 5, 103-125.
- Golder Associates (NZ) Ltd. (2002) Risk assessment for small landfill closure criteria. Waste Management Institute New Zealand Incorporated. Ministry for the Environment. Christchurch, NZ. Application 4176, <http://www.mfe.govt.nz/publications/waste/small-landfill-closure-dec02.pdf>
- Hunter J. H., Schuster R. L. (1968) Stability of Simple Cuttings in Normally Consolidated Clays, *Geotechnique*, Institution of Civil Engineers, Great Britain, 18, 372-378.
- Janbu N. (1967) Discussion of paper Dimensionless Parameters for Homogeneous Earth Slopes by Bell, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 93, 367-374.
- Kumar D., Alappat B. J. (2005) Analysis of leachate pollution index and formulation of sub-leachate pollution indices. *Waste Management and Research*, 22, 230-239.
- Lambe T. W.; Whitman R. V. (1990) *Mecánica de suelos* (New edition). Ed. Limusa. Mexico D.F.
- LCR. (2003) Risk Assessment for Contaminated Sites in New Zealand. Landcare Research. Wellington.
- Mavropoulos A. (2004) Landfill design using simplified risk assessment procedures. WIT Press. EPEM SA. Greece.
- MFE, (2004) Risk Screened System. Ministry for the Environment. Wellington, NZ.. <http://www.mfe.govt.nz/publications/hazardous/contaminated-land-mgmt-guidelines-no3/contaminated-land-mgmt-guidelines-no3.pdf>
- Morgenstern N.R. (1963) Stability Charts for Earth Slopes During Rapid Drawdown, *Geotechnique*, Institution of Civil Engineers, London, 13, 121-131.
- OMS (2001). Additional types of integration in risk assessment. World Health Organization. UNEP. ILO. Geneva. WHO/IPCS/IRA/01/02.
- PERM (2005) Evaluación de riesgos medioambientales. Pool Español de Riesgos Medioambientales. Entidad reaseguradora de riesgos de contaminación. www.perm.es . Madrid.
- Rapti-Caputo D., Sdao F., Masi S. (2006) Pollution risk assessment based on hydrogeological data and management. *Engineering Geology*, 85, 111-121.
- SEPA, (2002) Framework for risk assessment for landfill sites. The geological barrier, mineral layer and the leachate sealing and drainage system. Scottish Environment Protection Agency. 1-13. http://www.sepa.org.uk/pdf/guidance/landfill_directive/risk_assessment.pdf
- Suter, G., Vermeire, T., Munns, W., and Sekizawa J. (2001) Framework for the integration of health and ecological risk assessment. World Health Organization. Geneva. II.
- Suter, G., Vermeire T., Munns W., & Sekizawa J. (2005) An integrated framework for health and ecological risk assessment. *Toxicol. Appl. Pharm*, 207, 2611-2616.
- Taylor D.W. (1948) *Fundamentals of soils mechanics*. Ed. Wiley, New York.
- Terzagui K., Peck R.B. (1967) *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Ed. John Willey and Sons, Nueva York.
- U.S.D.A (1985), U.S.Department of Agriculture Soil Conservation Service Engineering Division, Earth Dams and Reservoirs. Technical Release. 60, 1985. <http://www.mde.state.md.us/assets/document/damsafety/NRCS/>

- U.S.EPA, (1995) Guidance on risk characterization. Science Policy Council. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, D.C.
- U.S.EPA, (1997) Guidance on Cumulative Risk Assessment. Science Policy Council. U.S. Environmental Protection Agency. Washington D.C.
- Wischmeier W. H.; Smith D. D. (1978) Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. Agricultural Handbook no.537, Sci. and Educ. Admin., U.S. Dept. Agr. Washington, D.C.
http://topsoil.nserl.purdue.edu/usle/AH_537.pdf