

Caracterización ambiental del árido derivado de escoria de acería de horno eléctrico para su empleo en capas de subbalasto

Environmental characterization of aggregate from electric arc furnace slag as sub-ballast layer material

Alicia Moral^{1*}, Jesús Hervás², Marilda Barra³ y Antonio Ruiz-Mateo⁴

Palabras clave

subbalasto;
escorias de acería;
mecanismos de lixiviación;
sustancias peligrosas en
productos de construcción;

Sumario

El árido que se destina a la construcción de capas de subbalasto debe satisfacer una serie de requisitos técnicos, entre los que se encuentran, el ajuste a un huso granulométrico específico y una permeabilidad limitada al agua. El coeficiente de permeabilidad vertical, K , del subbalasto compactado al 100% de la densidad máxima del Proctor Modificado, debe ser inferior o igual a 10^{-6} m/s, según recoge el Apartado 2 del Capítulo 7 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales de Materiales Ferroviarios (Orden FOM/1269/2006). La mezcla del árido derivado de escoria de acería de horno eléctrico (EAHE) con árido de aportación puede satisfacer estos requisitos. Bajo las condiciones de uso del árido que se destina a capas de subbalasto, cabe esperar que la difusión sea el mecanismo fundamental de incorporación de sustancias peligrosas al agua. El contenido del artículo describe la aplicación del ensayo de lixiviación GLHC “*Granular Low Hydraulic Conductivity*” (Ensayo de lixiviación de productos Granulares con Baja Conductividad Hidráulica) al árido derivado de EAHE como parte de la caracterización ambiental necesaria para su valorización potencial como árido para capas de subbalasto. Este ensayo forma parte del procedimiento que para la evaluación de la liberación de sustancias peligrosas está definiendo el comité técnico europeo CEN/TC351.

Keywords

sub-ballast;
steel slag;
leaching mechanism;
dangerous substances in
construction products;

Abstract

Aggregates for sub-ballast layer need to satisfy several technical requirements. These requirements include fitting to a specific particle size distribution and limited water permeability. According to Paragraph 2 of Chapter 7 of the General Technical Specifications for Railway Materials (FOM/1269/2006), the vertical permeability coefficient of the sub-ballast (K) compacted to 100 % of the maximum density of the modified Proctor, has to be equal to or less than 10^{-6} m/s. Aggregate from electric arc furnace slag (EAFS) and natural aggregate mixture can satisfy these technical requirements. It can be expected that the diffusion will be the main mechanism for the incorporation of dangerous substances to water under these intended use conditions. This paper describes the application of **Granular Low Hydraulic Conductivity (GLHC) test** to aggregate from EAFS as part of the environmental characterization of this material. This test is part of European assessment of release of dangerous substances from construction products in definition by the European technical committee, CEN/TC351.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos fundamentales de la Directiva 89/106/EEC de los Productos de Construcción (DPC) es garantizar la libre circulación en los países que conforman el Área Económica Europea de productos de construcción **seguros**. En su Anexo I, la DPC define los seis requisitos esenciales que deben satisfacer los productos de construcción: **1.-** Resistencia mecánica y estabilidad, **2.-** Seguridad frente al fuego, **3.-** Salud, higiene y medio ambiente, **4.-** Seguridad en el uso, **5.-** Protección frente al ruido, **6.-** Ahorro energético. Al tratarse de una

directiva de **nuevo enfoque**, los requisitos esenciales que contempla deben quedar plasmados en documentos elaborados por las organizaciones europeas de normalización. La mayor parte de estos requisitos se contemplaron en la primera generación de normas armonizadas de los productos de construcción, quedando aún pendiente la incorporación del requisito esencial 3 (RE3) “*Salud, higiene y medio ambiente*” (Bialucha y col. (2011)). Con el objeto de dar inicio al procedimiento de incorporación, la Comisión Europea (CE) elaboró y aprobó el mandato M/366 y revisó los mandatos de normalización de los productos de construcción afectados por la incorporación del mencionado requisito.

El mandato **M/366** “*Horizontal complement to the Mandates to CEN/CENELEC concerning the execution of standardisation work for the development of horizontal standardised assessment methods for harmonised approaches relating to dangerous substances under Construction Products Directive (CPD)*” fue dirigido al CEN/CENELEC el 16 de marzo de 2005. El objeto de este

* Corresponding author: alicia.moral@cedex.es

¹ Centro de Estudios del Transporte del CEDEX, Madrid, España.

² Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, Madrid, España.

³ Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.

⁴ Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX, Madrid, España.

mandato es el desarrollo de métodos que permitan la evaluación de los productos de construcción en cuanto a la liberación/emisión de sustancias peligrosas reguladas. El término **reguladas** se refiere a aquellas sustancias peligrosas asociadas con los productos de construcción que están prohibidas o bien sometidas a **límites legislativos europeos y/o nacionales**.

En su contenido, el M/366 define una serie de condicionantes que tiene que satisfacer el procedimiento de evaluación que elabore el CEN. Los métodos deben ser **armonizables y de aplicación horizontal**, aplicables al conjunto de los productos de construcción. Se debe determinar el potencial de liberación al **suelo** y al **agua** y/o la emisión al **aire interior**, de sustancias peligrosas **reguladas** bajo las **condiciones de uso previsto** del producto. Al exigirse definir el potencial de liberación, el procedimiento de evaluación debe centrarse no en el **contenido** de sustancias peligrosas sino en la fracción que en contacto con el agua, se incorporará a esta, bajo unas condiciones de pH, potencial redox, etc, a través de la actuación de diversos mecanismos (lavado de superficie, solubilidad, difusión) determinados por las condiciones derivadas del uso previsto. De ahí la necesidad de definir el comportamiento del producto de construcción frente a la lixiviación, **elución** cuando el fenómeno se desarrolla bajo las condiciones de un método de ensayo en el laboratorio.

Para dar respuesta a este mandato, en abril de 2006 se creó el comité técnico europeo de normalización **CEN/TC351** "Assessment of release of dangerous substances" cuya secretaría es responsabilidad del NEN (Nederlands Normalisatie-Instituut), el Instituto de Normalización de los Países Bajos. Dentro de este comité técnico, el grupo de trabajo **CEN/TC351/WG1** "Horizontal test methods for leaching to soil, ground and surface water" es responsable de la definición de los métodos de lixiviación de los productos de construcción que en su uso previsto, entran en contacto directo con el suelo y el agua, superficial y subterránea.

Como consecuencia de todo ello, el Comité Europeo de Normalización (CEN) ha aprobado las especificaciones técnicas **CEN/TS 16637-1:2014** "Guidance for the determination of leaching tests and additional testing steps" y **CEN/TS 16637-2:2014** "Horizontal dynamic surface leaching test" y tiene muy avanzados

los trabajos del proyecto de especificación técnica **FprCEN/TS 16637-3:2014** "Horizontal up-flow percolation test".

La CEN/TS 16637-1:2014 es una guía dirigida a los comités técnicos de producto que les proporciona criterios para seleccionar el método de ensayo más adecuado para los productos de construcción que están bajo el alcance del comité (figura 1). En esencia contempla dos escenarios de liberación y transferencia de contaminantes: el **escenario I**, aplicable a productos impermeables o con permeabilidad baja al agua, y el **escenario II**, aplicable a productos permeables. En el primero se considera que la transferencia al medio de los contaminantes se produce por difusión, en base al gradiente de concentración creado entre el agua en los poros del material y el agua en el exterior. Los productos que en su uso se encuentran bajo estas condiciones, se ensayarán aplicando la especificación técnica CEN/TS 16637-2:2014. En el escenario II, el agua circula a través del material transfiriéndose las sustancias al agua a través de un mecanismo de percolación, condicionado fundamentalmente por la solubilidad. Los productos bajo este escenario de uso se ensayarán aplicando la especificación técnica CEN/TS 16637-3:2014, aún no aprobada.

Los **productos monolíticos** y los **granulares monolíticos** como escolleras, balastos, bloques o placas de hormigón, recubrimientos asfálticos y hormigones, etc. se ensayarán por el método **DSLIT "Dynamic Surface Leaching Test"** (Ensayo de lixiviación de superficie dinámica), descrito en la especificación técnica **CEN/TS 16637-2:2014**.

Los **productos granulares** cuyo tamaño de partícula, propiedades autocementantes y grado de compactación en el uso previsto impidan una percolación significativa (Moral y Fernández (2013)) se ensayarán por el método **GLHC "Granular Low Hydraulic Conductivity"** (Ensayo de lixiviación de productos granulares con baja conductividad hidráulica), una variante del anterior descrita en el anexo A de dicha especificación técnica.

El resto de los productos granulares se ensayarán por el método **"Up-flow percolation test"** (Ensayo de lixiviación en columna con flujo ascendente), descrito en el proyecto de especificación técnica **FprCEN/TS 16637-3:2014**.

Por tanto, el método de lixiviación que se aplica a los **áridos** y dentro de éstos, a los que proceden de fuentes no tradicionales como las **escorias de acería de horno eléctrico**

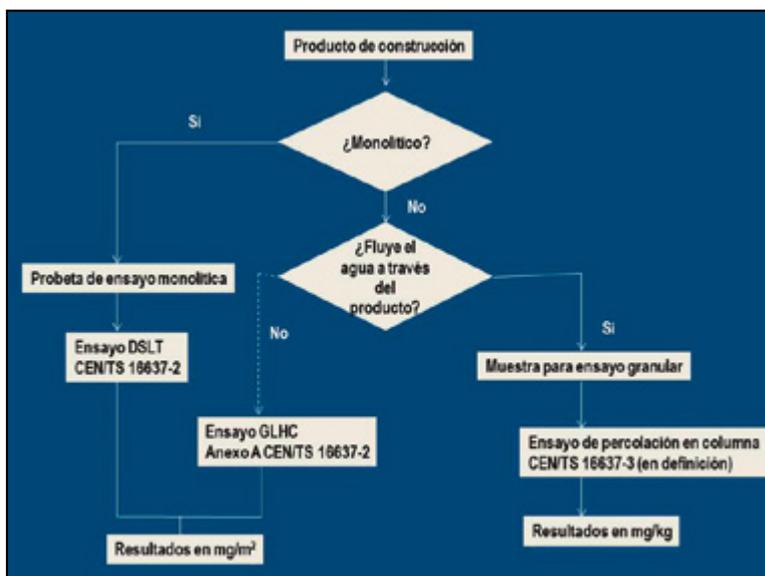


Figura 1. Diagrama para la selección del método de ensayo.

(EAHE) está íntimamente ligado a los escenarios de uso. Los usos con ligante (cemento o betún) dan como resultado productos monolíticos que deberán ensayarse por el método **DSLIT**. Para los usos sin ligante, dependerá de la conductividad hidráulica del árido bajo las condiciones de aplicación.

El presente artículo propone la utilización del ensayo GLHC para materiales granulares que se destinan a capas de subbalasto. El subbalasto es un material que forma parte de la estructura total de asiento de las líneas férreas, absorbe las tensiones procedentes del balasto y las difiere de forma homogénea a la plataforma de apoyo. El Pliego de Prescripciones Técnicas Generales de Materiales Ferroviarios (Orden FOM/1269/2006) recoge en su Capítulo 7, las características técnicas del subbalasto que se utiliza como capa soporte de vías férreas, sus condiciones de puesta en obra y los controles de calidad a los que debe ser sometido. El apartado 2 contiene las características que debe cumplir el material y el subapartado 2.4 se refiere a la permeabilidad. En relación a la permeabilidad se indica que el coeficiente de permeabilidad vertical del subbalasto (K), compactado al 100% de la densidad máxima del Proctor Modificado, deberá ser inferior a 10^{-6} m/s. Se trata por tanto de un material relativamente impermeable a las aguas procedentes del balasto y suficientemente permeable a las aguas que ascienden por capilaridad de la plataforma.

Los métodos que se han indicado forman parte de la propuesta del procedimiento de evaluación de los productos de construcción y permiten su **caracterización ambiental**. Ofrecen información sobre el comportamiento de estos materiales frente a la lixiviación, permiten determinar el mecanismo fundamental que condiciona la incorporación de sustancias peligrosas al agua y el ritmo de su incorporación bajo las condiciones de ensayo. Por tanto, permiten realizar previsiones de la evolución del material en función de las variables fundamentales en el proceso de incorporación de sustancias peligrosas al agua. Se trata de métodos orientados al **Análisis Inicial de Tipo** que exige el marcado CE. Actualmente estos métodos de lixiviación se encuentran en fase de aprobación. En un futuro se espera que se conviertan en normas europeas de ensayo, una vez que finalice su validación.

El estudio que se describe a continuación es una colaboración del CEDEX con la Universidad Politécnica de Cataluña dentro del proyecto “Árido Siderúrgico en Capa de Subbase y de Forma en Plataformas Ferroviarias, ASICAP” financiado por el MINECO en la convocatoria INNFACTO 2011.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El material que se sometió a ensayo GLHC era una mezcla constituida por árido derivado de EAHE y caliza en la proporción 70-30 en peso y granulometría inferior a 4 mm (figura 2).



Figura 2. Mezcla de escoria de acería de horno eléctrico y caliza.

2.1. Preparación de las probetas de ensayo

Para la preparación de las probetas de ensayo se siguió el procedimiento descrito en el Anexo 1 de la especificación técnica **CEN/TS 16637-2:2014**. La muestra de laboratorio (9 kg) se cuarteó con un divisor de muestra rifle para obtener las siguientes fracciones:

- 3 se destinaron a la obtención de las probetas para el ensayo GLHC.
- 3 se emplearon en la determinación de la humedad de la muestra.
- 1 que tras el pretratamiento adecuado se sometió a ensayo de máxima disponibilidad **NEN 7371: 2004**. “*The determination of the availability of inorganic components for leaching*”.

En la preparación de la probeta de ensayo, se aplicaron 30 golpes con maza de teflón de 500 g desde una altura de 20 cm (figura 3).



Figura 3. Elaboración de probetas de ensayo.

Una vez finalizado el proceso de llenado y compactación, se pesó la probeta y la superficie se cubrió con bolas de vidrio previamente lavadas con ácido nítrico. En la figura 4 se ofrece una imagen del aspecto final de una de las probetas de ensayo.

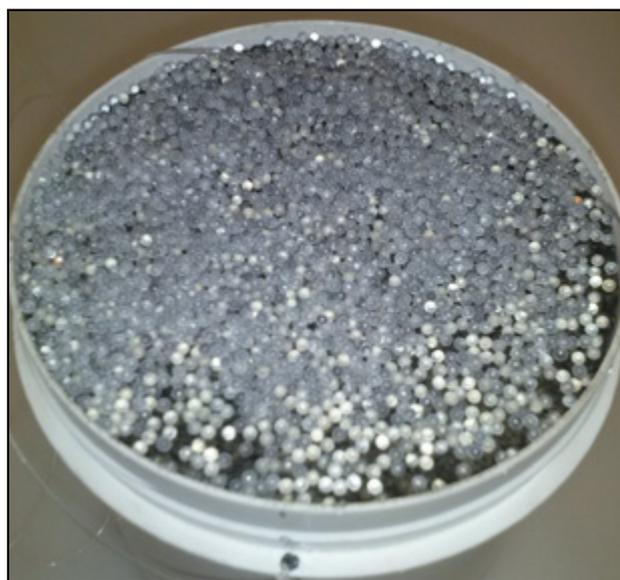


Figura 4. Probeta de ensayo.

Se trabajó con una relación líquido/área (L/A) de 8,8 cm^3/cm^2 . En la tabla 1 se ofrece información sobre la densidad de cada una de las probetas de ensayo y el volumen de

agua requerido por cada probeta para alcanzar la relación L/A de trabajo. En el cómputo del volumen de eluyente, se tuvo en cuenta el agua que se adicionó a la mezcla de áridos antes de su compactación.

Tabla 1. Probetas de ensayo: densidad y volumen de eluyente, agua.

Nomenclatura	Densidad (g/cm ³)	Volumen eluyente (ml)
Probeta R1	2,25	638,9
Probeta R2	2,19	638,5
Probeta R3	2,24	631,5

Tras la elaboración, las probetas se taparon y se dejaron acondicionar un fin de semana a 22°C, temperatura a la que se desarrolló el ensayo. Por último, se insertó un dispositivo que facilitase la extracción de la probeta en la renovación del eluyente (figura 5).



Figura 5. Renovación del eluyente.

2.2. Ejecución del ensayo de lixiviación

El ensayo GLHC es un método de lixiviación en el que el agua en contacto con la superficie del material se renueva con una frecuencia definida. Las probetas se sometieron a 8 renovaciones con la frecuencia que recoge la tabla 2. El procedimiento general seguido para efectuar una renovación concreta consistió en extraer la probeta, pesar el eluato (agua) y extraer tres alícuotas. En la primera se determinó el pH, la conductividad eléctrica a 20°C y el potencial redox, mediante un sistema Metrohm 867 acoplado para la medida secuencial de estas variables. Las otras dos se destinaron a la caracterización química del eluato. Se filtraron a través

de una membrana de 0,20 µm y posteriormente se sometieron a análisis. Se determinó la concentración de aluminio, antimonio, arsénico, bario, cadmio, cobre, cromo, estaño, mercurio, molibdeno, níquel, plomo, selenio, vanadio, cinc, cloruro, fluoruro, sulfato, sodio, calcio y magnesio.

El análisis de iones se efectuó mediante Cromatografía Iónica en un equipo Metrohm 850-Professional IC Instrument de doble vía, con procesador automático de muestra, 858 IC Sample Processor System. Los aniones se separaron con una columna de alcohol polivinílico funcionalizada con grupos de amonio cuaternario y los cationes mediante una columna Metrosep C3 de alcohol polivinílico con grupos carboxilos. Se empleó una disolución de ácido nítrico 5 mmol/L como eluyente de cationes y una disolución 7,5 mmol/l de carbonato de sodio como fase móvil de aniones. Para incrementar la intensidad de la señal de aniones se empleó un supresor químico.

El contenido de metales se determinó mediante Espectroscopía Óptica de Emisión, de Plasma generado por acoplamiento Inductivo, en un equipo Varian Vistapro que operó bajo las siguientes condiciones: potencia 1,35 kW, flujo de plasma 16,5 L/m de argón y nebulizador ultrasónico CETAC. El contenido de mercurio se determinó por Espectrometría de Absorción Atómica con captura previa de mercurio en trampa de oro en un equipo DMA-80 de Milestone.

Tabla 2. Frecuencia de renovación del eluyente.

Etapas/ Fracción Nº	Duración de la etapa	Duración desde el inicio del ensayo
1	6 h ± 15 min	6 horas
2	18 h ± 15 min	1 día
3	1 d, 6 h ± 45 min	2 días y 6 horas
4	1 d, 18 h ± 75 min	4 días
5	5 d ± 75 min	9 días
6	7 d ± 75 min	16 días
7	20 d ± 7 h	36 días
8	28 d ± 12 h	64 días

2.3. Ensayo de máxima disponibilidad

Una de las fracciones resultantes de la división de muestra se destinó a la determinación de la **concentración máxima disponible** (NEN 7371:2004) de cada uno de los contaminantes de interés. Esta fracción (500 g) se trituró en un molino planetario de bolas y tarro de carburo de wolframio, marca FRITSCH, modelo Pulverisette 6. A continuación se tamizó. El material con una granulometría superior a 125 µm, se volvió a triturar hasta que la totalidad de la muestra inicial presentó una granulometría inferior a 125 µm. La mezcla de árido de escoria y caliza una vez triturada y tamizada se sometió también por triplicado, a ensayo de máxima disponibilidad según norma NEN 7371: 2004. Para la dosificación de la disolución de ácido nítrico 1M se empleó una bureta Dosino 800 (20 ml) acoplada a un sistema Metrohm 867. Los eluatos obtenidos en las distintas etapas del ensayo se centrifugaron a 3600 rpm durante 5 minutos en un equipo Heraeus Sepatech modelo Labofuge GL. El líquido clarificado derivado de cada etapa, se homogeneizó y filtró a través de una membrana de 0,20 µm. Se determinó el contenido de aluminio, antimonio, arsénico, bario, cadmio, cobre, cromo, estaño, molibdeno,

níquel, plomo, selenio, sodio, vanadio y cinc en los eluatos mediante Espectroscopía Óptica de Emisión, de Plasma generado por acoplamiento inductivo, en un equipo Varian Vistapro que operó bajo las siguientes condiciones: potencia 1,35 kW, flujo de plasma 16,5 L/m de argón y nebulizador ultrasónico CETAC. El contenido de mercurio se determinó por Espectrometría de Absorción Atómica con captura previa de mercurio en trampa de oro en un equipo DMA-80 de Milestone.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El árido derivado de EAHE mejora sus propiedades de compactación si se mezcla con árido de aportación. La mezcla sometida a ensayo CGLH estaba compuesta por árido de EAHE y caliza en proporción másica 70-30, ya que en las condiciones de uso previstas se trabajará con la mezcla y no únicamente con el árido de EAHE. El ensayo CGLH proporciona información sobre el comportamiento de un producto de construcción frente a la lixiviación/elución de sustancias peligrosas al agua. En concreto, para una relación L/A analiza cómo evoluciona la composición del agua en función del tiempo y permite discriminar qué mecanismos están involucrados en la incorporación de cada sustancia peligrosa de interés.

3.1. Composición de los eluatos derivados del ensayo CGLH

Los eluatos obtenidos en las 8 renovaciones efectuadas al agua en contacto con cada una de las probetas ensayadas, fueron analizados para determinar la concentración de sustancias peligrosas reguladas asociadas a áridos y en concreto al derivado de EAHE. Además se determinaron especies químicas que no estando limitadas, son de interés para el estudio. Como se ha indicado previamente, se determinaron los elementos y especies químicas: **aluminio, antimonio, arsénico, bario, cadmio, cobre, cromo, estaño, mercurio, molibdeno, níquel, plomo, selenio, vanadio, cinc, cloruro, fluoruro, sulfato, sodio, calcio y magnesio.**

Para facilitar la exposición de los resultados y atendiendo a su concentración en los distintos eluatos, el conjunto de sustancias analizadas se ha agrupado de la siguiente forma:

- **Grupo 1:** Integrado por los elementos o especies químicas cuya concentración fue siempre inferior al límite de detección del equipo de análisis.
- **Grupo 2:** Formado por los elementos o especies químicas cuya concentración se encontró en ocasiones por encima del límite de detección pero próxima a él.
- **Grupo 3:** Integrado por los elementos o especies químicas cuya concentración se encontró en todos los casos por encima del límite de detección.

Estos agrupamientos permiten limitar el alcance del estudio. Para los elementos o especies que pertenecen a los grupos 1 y 2 no resulta posible definir su mecanismo de incorporación al agua, debido a la incertidumbre sobre su concentración y evolución a lo largo del tiempo de ensayo.

La tabla 3 identifica los elementos o especies químicas que pertenecen a ambos grupos junto con su límite de detección.

Tabla 3. Elementos de los grupos 1 y 2.

Elementos Grupo 1	Límite de detección (µg/l)
Arsénico	10,7
Cadmio	0,6
Estaño	4
Mercurio	0,323
Níquel	1
Selenio	1,2

Elemento/Especie química Grupo 2	Límite de detección (µg/l)
Antimonio	3,9
Cinc	4
Cobre	6
Cromo	1,7
Plomo	16,2
Fluoruro	200

La tabla 4 presenta la composición media del eluato de cada una de las fracciones obtenidas en las 8 renovaciones efectuadas al agua en contacto con las 3 probetas ensayadas, para los **elementos** que integran el grupo 3. Se ha incorporado el intervalo del valor medio para un nivel de confianza del 95% como estimador de la variabilidad asociada a la matriz y al ensayo. La tabla 5 contiene la misma información referida a las **especies químicas** analizadas.

El pH de todos los lixiviados fue siempre **básico**, como corresponde a una mezcla de escoria y caliza (figura 6). Se mantuvo estable (variación inferior a 0,5 unidades) en los 64 días en los que se ejecutó el ensayo y en las distintas renovaciones a las que se sometieron las tres probetas. Este es un requisito necesario para asegurar que en el proceso de elución, el pH no ha sido una variable condicionante de la incorporación de sustancias peligrosas al agua, actuando la difusión como mecanismo fundamental. En los mismos términos se puede hablar del potencial de óxido-reducción de los eluatos. Los valores observados (figura 7) muestran que el agua en contacto con las probetas presentó un potencial redox **oxidante**, que se mantuvo prácticamente constante en el tiempo de ensayo. Dada la estabilidad de las condiciones oxidantes, cabe afirmar que el potencial redox no ha actuado como factor condicionante de la solubilidad de especies químicas y por tanto no ha determinado la magnitud en la que los elementos y especies analizadas se han incorporado al agua.

La conductividad eléctrica mostró valores crecientes con el tiempo de contacto entre la probeta y el agua. La conductividad eléctrica es un parámetro indicativo de la presencia de sales solubles, su magnitud se ha relacionado con las concentraciones de sodio y cloruro en los eluatos, especies químicas sobre las que la matriz sólida no mostró una retención significativa. En la figura 8 se muestra la relación entre la concentración de cloruro en los lixiviados expresada en milimoles/litro con la conductividad media de los distintos eluatos, poniéndose de manifiesto la alta correlación entre ambas variables

Tabla 4. Concentración en los eluatos. Elementos del grupo 3

Eluato Tiempo desde el inicio del ensayo	Aluminio		Bario		Molibdeno		Vanadio	
	Valor medio (µg/l)	Intervalo (µg/l)	Valor medio (µg/l)	Intervalo (µg/l)	Valor medio (µg/l)	Intervalo (µg/l)	Valor medio (µg/l)	Intervalo (g/l)
Renovación 1 0,25 d	1205	664,8	56	19,9	4,7	3,5	3	1,7
Renovación 2 1 d	879	55,3	73	4,6	2,3	0,7	2	0,7
Renovación 3 2,25 d	831,3	362,9	87	54,8	3,3	1,7	4	2,6
Renovación 4 4 d	420,3	156,2	59	21,8	2,0	1,1	3	1,1
Renovación 5 9 d	668	193,4	123	42,7	4,0	2,0	9	2,3
Renovación 6 16 d	809,7	182,1	216	107,8	5,7	2,4	19	8,8
Renovación 7 36 d	525,5	135,1	234	4,7	11,1	0,1	50	1,9
Renovación 8 64 d	214,3	19,8	214	12,3	11,3	0,5	86	2,7

Tabla 5. Concentración en los eluatos. Especies químicas del grupo 3

Eluato Tiempo desde el inicio del ensayo	Cloruro		Sulfato		Sodio		Calcio		Magnesio	
	Valor medio (µg/l)	Intervalo (µg/l)								
Renovación 1 0,25 d	5801	1504,2	1305	330,7	10343	3622,7	8394	1442,6	147	80,1
Renovación 2 1 d	6172	271,8	1082	23,9	9948	131,2	9517	871,9	95	79,4
Renovación 3 2,25 d	5027	477,8	868	77,2	6920	1337,4	10107	886	65	63,5
Renovación 4 4 d	5684	519	846	41,2	7875	1369,5	10342	560	91	44
Renovación 5 9 d	11871	264,1	1309	19,9	17211	1956,7	10388	1468,6	134	20,9
Renovación 6 16 d	14232	510,3	1401	24,5	21109	1522,1	9574	1633,7	160	65
Renovación 7 36 d	26601	211,6	2202	26,1	49822	1378	5646	991,8	238	227,4
Renovación 8 64 d	29356	628,9	2245	54,9	60178	750,6	5817	163,5	288	55,7

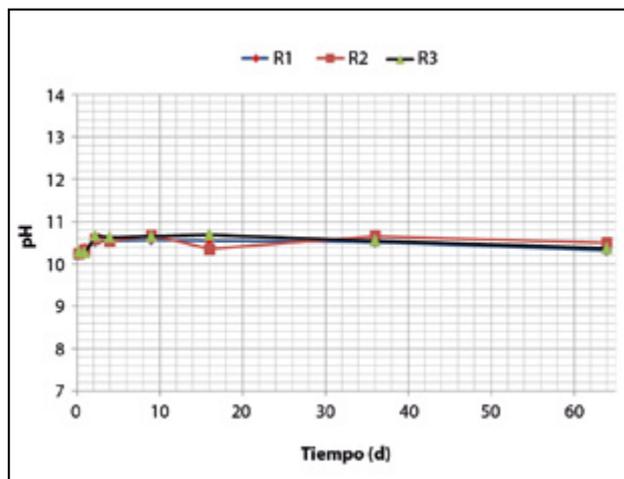


Figura 6. Evolución del pH de los eluatos.

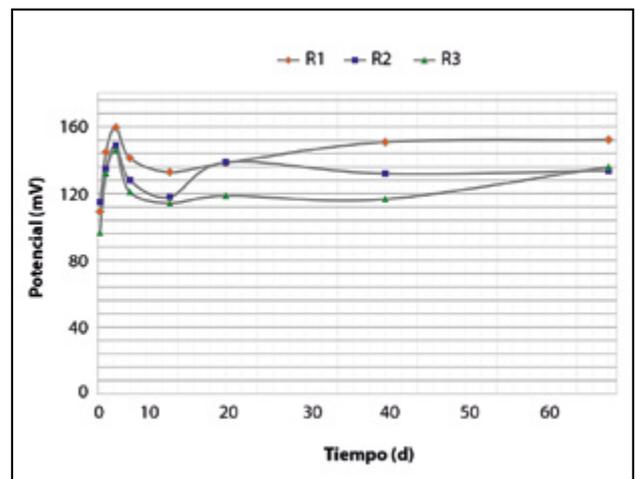


Figura 7. Evolución del potencial redox de los eluatos.

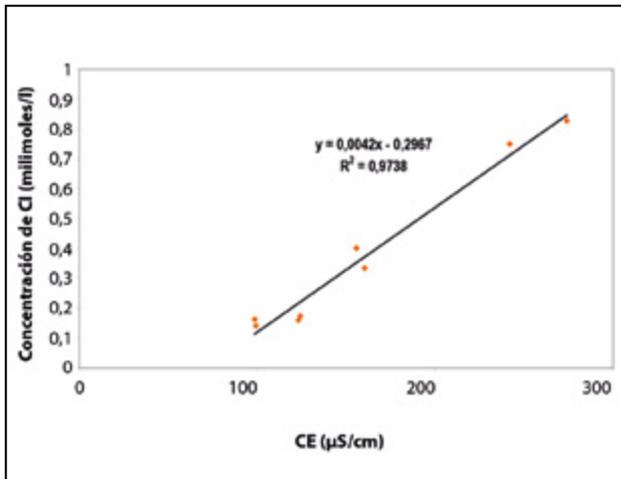


Figura 8. Relación entre la conductividad eléctrica y la concentración de Cl⁻ en el eluato.

3.2. Liberación de sustancias peligrosas en relación a la superficie expuesta

Los **ensayos de lixiviación para la caracterización de materiales**, entre los que se encuentra el GLHC, ofrecen una descripción de su comportamiento frente a las variables que condicionan la incorporación de contaminantes al agua. Esta información es básica cuando se trata de definir el **término fuente** en la modelización de la dispersión de contaminantes en el medio ambiente y en la predicción del comportamiento del material a largo plazo. En el ensayo GLHC, la probeta de ensayo se comporta como un **material monolítico (poco permeable)** ofreciendo tan sólo una superficie al contacto con el agua. La relación entre el volumen de agua y la superficie expuesta (**relación L/A**) se mantiene constante a lo largo del ensayo. Por tanto, lo que varía de una renovación a otra es el tiempo en el que la superficie está en contacto con el agua.

Los resultados del ensayo de GLHC se expresan en términos de masa total de contaminante liberada en relación al área expuesta. Para ello se determina la cantidad r_i (mg/m²) de contaminante liberada al agua empleada en cada renovación por unidad de superficie expuesta, teniendo en cuenta la siguiente relación:

$$r_i = \frac{c_i \times V}{A} \times 0,001 \quad [1]$$

Siendo:

c_i : concentración del contaminante en el eluato de la etapa "i", en μg/l.

V: volumen del eluato, en litros.

A: superficie de la probeta en contacto con el agua, en m².

El ensayo dispone de ocho etapas de renovación, por tanto i varió entre 1 y 8.

Una vez calculada la liberación producida en cada etapa, la liberación acumulada o total R_i producida al final de la etapa "i" en relación al área expuesta, será la suma de las liberaciones de esa etapa y de las anteriores (tabla 6). Las figuras 9 y 10 presentan gráficamente los resultados obtenidos de r_i y R_i para los elementos y las especies químicas del grupo 3. Se presentan gráficamente los resultados porque

de esta forma resulta más fácil apreciar si el transporte de contaminantes al agua responde a un mecanismo de **difusión pura** y, en caso contrario, en qué medida se desvía de éste. En los gráficos donde se representa R_i se ha trazado en color rojo una recta con pendiente $\frac{1}{2}$ que pasa por el punto (t_i, R_i) . La utilidad de esta recta se explica a continuación.

Para la interpretación de las figuras se tendrá en cuenta que:

- Si el mecanismo de liberación de sustancias peligrosas al agua es la difusión pura según las leyes de Fick y si se supone que la concentración en el agua en contacto con la probeta es despreciable en comparación con la concentración en el agua de los poros, se puede demostrar (Crank, 1975) que la cantidad $R(t)$ (mg/m²) liberada (por unidad de superficie) acumulada desde el inicio del ensayo hasta el instante t es:

$$R(t) = 2 \times c_0 \times \left(\frac{D}{\pi} \right)^{1/2} \times t^{1/2} \quad [2]$$

donde D (m²/s) es el coeficiente de difusión y c_0 (mg/m³) es la cantidad de contaminante lixiviado presente al inicio del ensayo en cada unidad de volumen de muestra saturada. Esta concentración puede expresarse como $c_0 = r \cdot c_{m,0}$ donde r (kg/m³) es la densidad aparente de la muestra seca y $c_{m,0}$ es la cantidad de contaminante lixiviado inicialmente por unidad de masa de muestra seca.

Nótese que $R(t)$ es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo.

- La cantidad r_i (mg/m²) liberada (por unidad de superficie) durante la etapa "i" puede expresarse como $r_i = R_i - R_{i-1}$ y, por lo tanto, es proporcional a la diferencia $(t_i^{1/2} - t_{i-1}^{1/2})$, siendo t_i el tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo hasta el final de la etapa "i".
- Las duraciones de las etapas de lixiviación establecidas por la especificación técnica CEN/TS 16637-2:2014 se han elegido de forma que los valores de las diferencias $(t_i^{1/2} - t_{i-1}^{1/2})$ sean iguales entre sí para las cuatro primeras etapas (0,5 d^{1/2}), el doble para las etapas 5 y 6 (1 d^{1/2}) y el cuádruple para las etapas 7 y 8 (2 d^{1/2}).

Por lo tanto, si el mecanismo de liberación fuera de **difusión pura** desde el inicio, los puntos del gráfico que representan los valores de R_i en función de t_i con escalas logarítmicas para ambas variables se encontrarían sobre una recta de pendiente $\frac{1}{2}$ y la ordenada correspondiente a $t = 1$ día multiplicada por el factor $\pi^{1/2}/2$ sería igual al producto $c_0 D^{1/2}$. Además, el gráfico que representa los valores de r_i tendría valores iguales para las cuatro primeras etapas, valores dobles para las etapas 5 y 6 y valores cuádruples para las etapas 7 y 8. En la medida en que los gráficos con los resultados experimentales se desvíen de estas características, los mecanismos de liberación se habrán desviado de la difusión pura.

Los gráficos de las figuras 9 y 10 muestran que **bario, molibdeno, cloruro, sulfato, sodio y magnesio** respondieron a un patrón de difusión como mecanismo principal de liberación. **El aluminio y el calcio** presentaron un

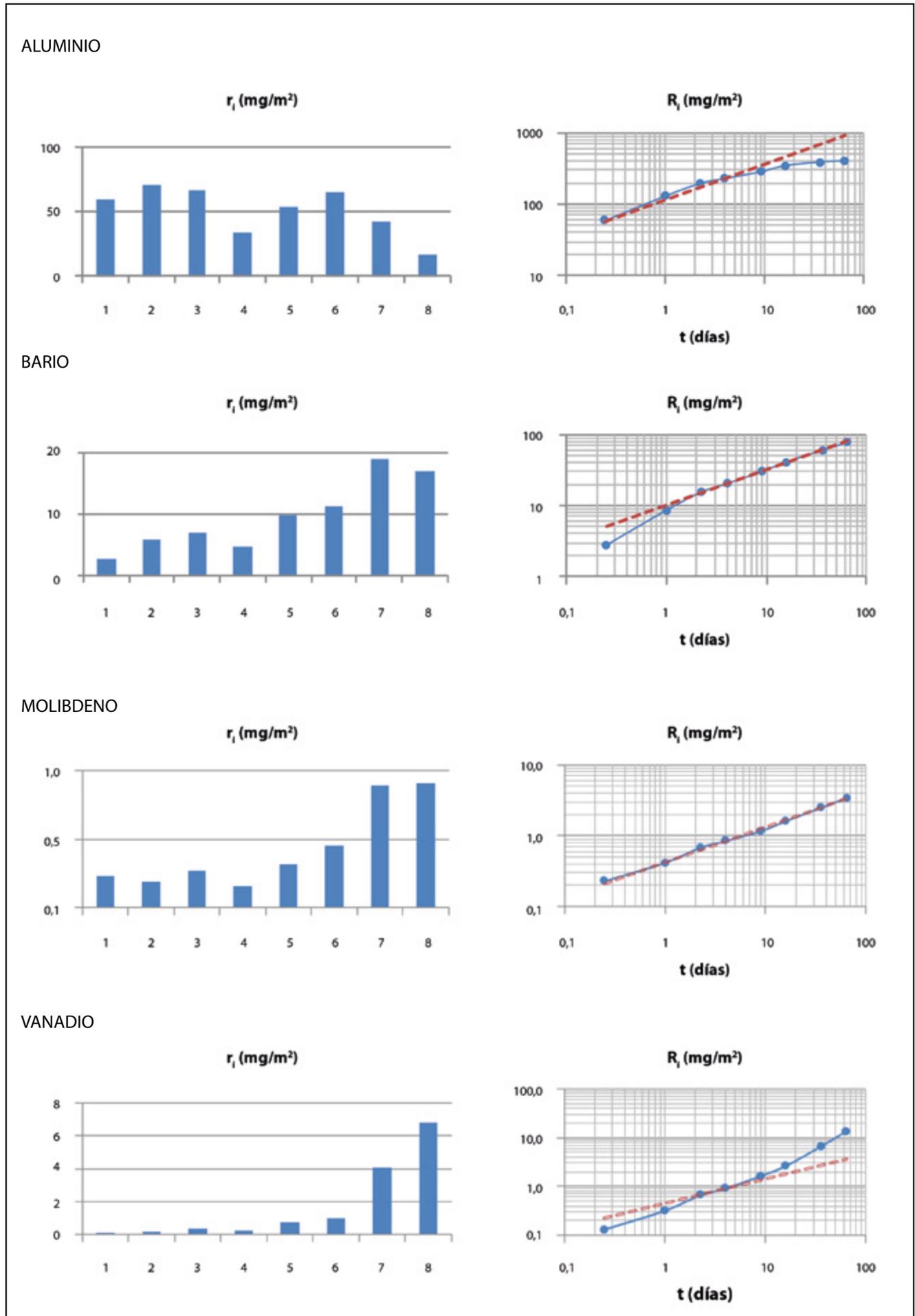


Figura 9. Representación gráfica de las cantidades liberadas (por unidad de superficie) en cada etapa (r_i) y acumuladas desde el inicio del ensayo (R_i). Elementos del grupo 3.

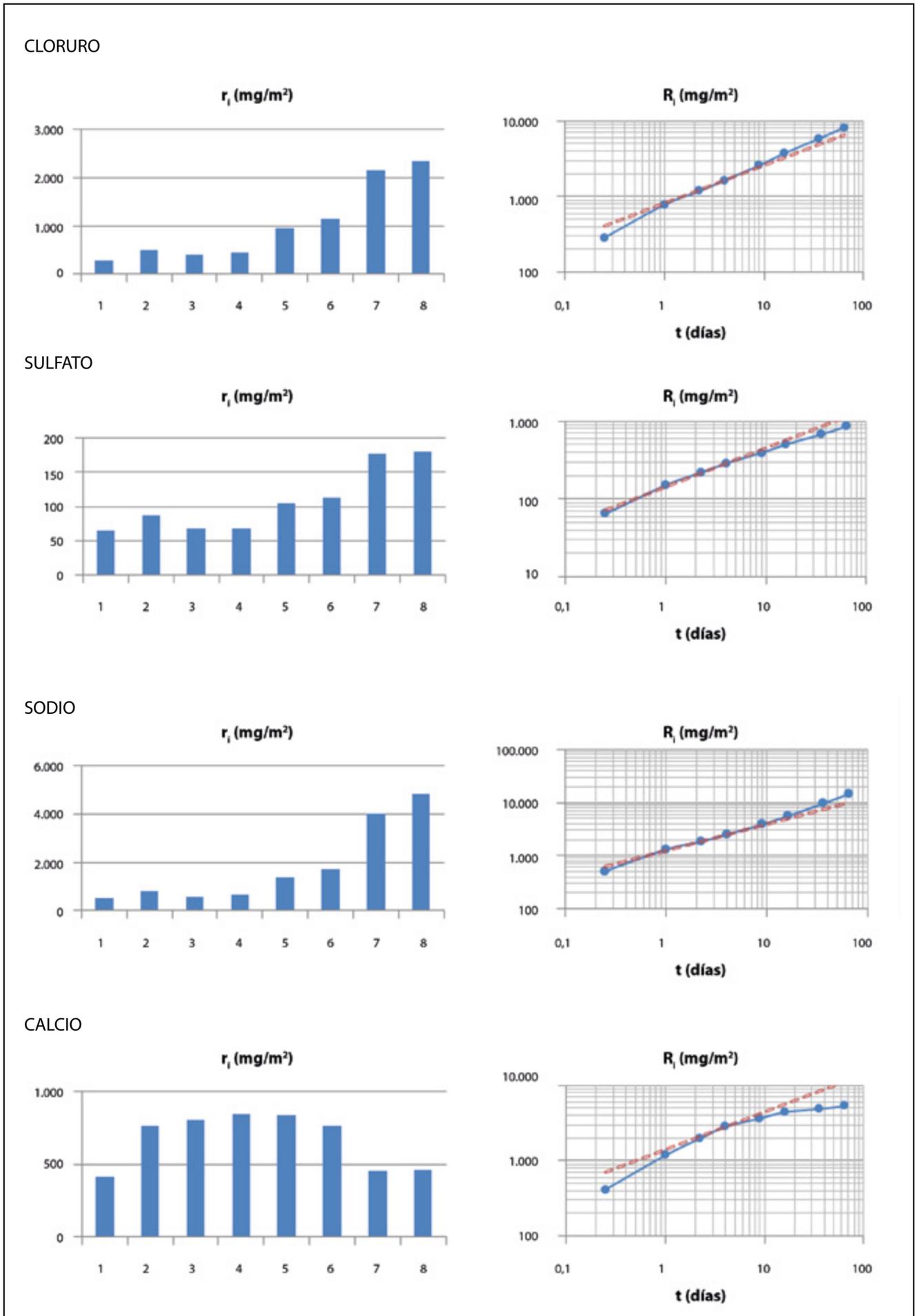


Figura 10. Representación gráfica de las cantidades liberadas (por unidad de superficie) en cada etapa (r_i) y acumuladas desde el inicio del ensayo (R_i). Especies químicas del grupo 3.

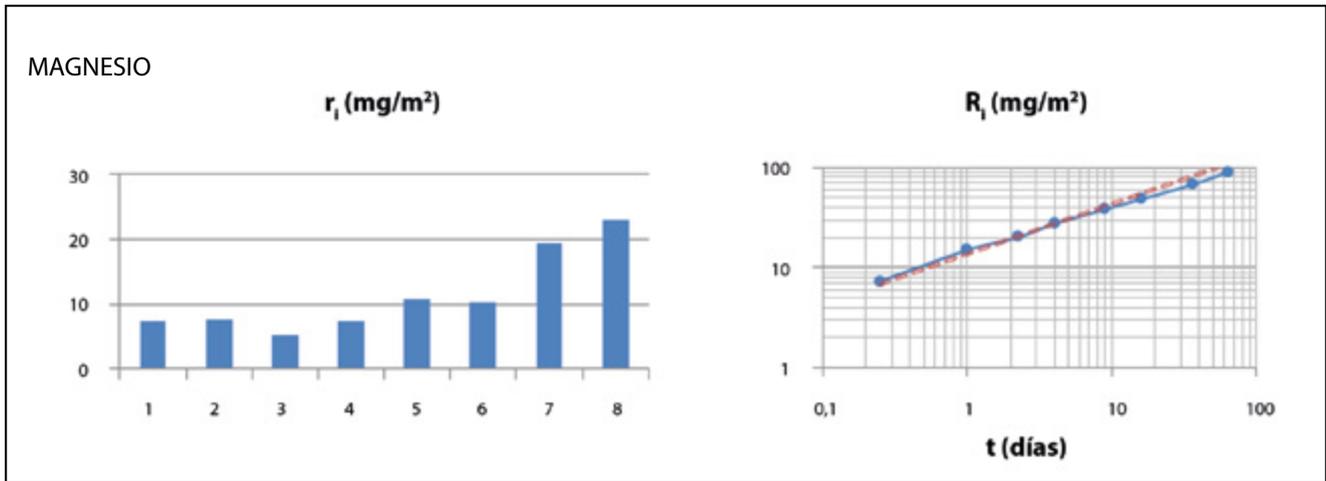


Figura 10 (Continuación). Representación gráfica de las cantidades liberadas (por unidad de superficie) en cada etapa (r_i) y acumuladas desde el inicio del ensayo (R_i). Especies químicas del grupo 3.

patrón que podría interpretarse como agotamiento del contaminante a partir de la etapa 4 en el primero y de la etapa 5 en el segundo, aunque también pueden existir otras causas. El **vanadio** presentó un patrón de liberación acumulada que fue casi proporcional al tiempo transcurrido (curva $R_i - t_i$ con pendiente 1), lo que equivale a una tasa de liberación ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$) constante en el tiempo. Podría interpretarse en el sentido de que la matriz mineral repone rápidamente el contaminante que por difusión va migrando hacia la superficie, reposición forzada por la incorporación de especies catiónicas al eluato. Lo que explicaría que el gradiente de concentración permaneciera prácticamente constante a lo largo del ensayo.

3.3. Valoración de las cantidades totales liberadas por unidad de superficie en los ensayos

La tabla 6 recoge los resultados obtenidos en la determinación de la cantidad total de sustancia de interés liberada por unidad de superficie. Cuando la concentración real del contaminante se encontró por debajo del límite de detección del equipo, los valores indicados corresponden a las **cantidades máximas** que cabe esperar se incorporen al agua. En la mencionada tabla, se incluyen los valores medios derivados de las tres repeticiones efectuadas y el intervalo del valor medio para un nivel de confianza del 95%.

Los valores totales o valores de emisión que recoge la tabla 6 adquieren un sentido cuando se les contrasta con limitaciones de tipo legislativo, normativo etc. Este tipo de ensayo no resulta de aplicación en ninguna legislación estatal o autonómica vigente en España. Para encontrar un referente de este tipo, se debe acudir a la legislación de los Países Bajos, concretamente al **Soil Quality Regulation (SQR)** (2006) que en su Anexo A recoge los Requisitos de Emisión que aplican a parámetros inorgánicos. Estos valores se han incorporado en la tabla 6. Se hace referencia a umbrales legislativos con el único objetivo de situar en magnitud la emisión de contaminantes que se ha observado en los ensayos, no se trata de definir la idoneidad o no de un material para un determinado uso, ya que en ese caso, las conclusiones no podrían derivar del ensayo de una muestra puntual. En relación a la magnitud de la emisión observada y a los umbrales recogidos en el SQR,

la liberación de contaminantes siempre fue inferior a estos últimos.

Tabla 6. Cantidad de sustancia de interés liberada al agua por unidad de superficie de material expuesto (R_{64} , mg/m^2). Comparación con los umbrales del SQR

Sustancia de interés	Umbral de Emisión (SQR) (mg/m^2)	Cantidad total liberada (R_{64}) Valor medio (mg/m^2)	Intervalo del valor medio al 95% ($\pm \text{mg}/\text{m}^2$)
Aluminio	NO APLICA	345,5	54,6
Antimonio	8,7	2,2	0,2
Arsénico	260	<5,74	---
Bario	1500	68,1	9,4
Cadmio	3,8	<0,3	---
Cinc	800	2,4	0,2
Cobre	98	1,5	0,2
Cromo	120	0,7	0,1
Estaño	50	<2,1	---
Mercurio	1,4	<0,2	---
Molibdeno	144	2,9	0,4
Níquel	81	<0,5	---
Plomo	400	<5,7	---
Selenio	4,8	<0,6	---
Vanadio	320	15,7	3,0
Calcio	NO APLICA	4694	437,4
Cloruro	110.000	8333,3	994,7
Fluoruro	2.500	<101,7	---
Magnesio	NO APLICA	79,8	31,3
Sodio	NO APLICA	12634,6	524,7
Sulfato	165.000	758,1	21,8

3.4. Liberación máxima de contaminante

El ensayo NEN 7371:2004 se denomina de forma simplificada de máxima disponibilidad o de máxima liberación. Con su ejecución se trata de evaluar la cantidad máxima de sustancias peligrosas o de otro componente de interés, que puede ser liberada de un material granular en condiciones extremas, una vez producida su

desintegración y superada su capacidad de neutralización ácida. Estas condiciones extremas se trasladan al laboratorio sometiendo a la muestra a un ataque con ácido durante dos horas a pH 7 y otras dos, a pH 4, registrándose su consumo (figura 11). Se emplea el ácido nítrico como agente acidulante y oxidante, en una concentración que depende de la naturaleza del material que se ensaya.

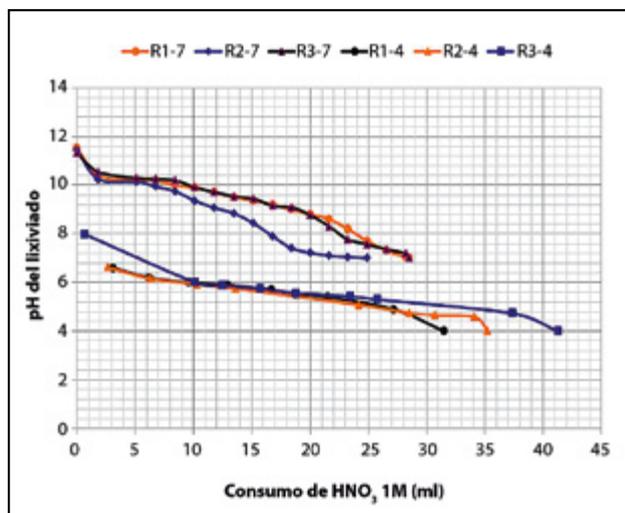


Figura 11. Ensayo NEN 7371:2004 aplicado a la mezcla de árido de EAHE y caliza.

Como se mostrará posteriormente, los resultados de este ensayo son necesarios para poder estimar la magnitud en que la matriz sólida ofrece una resistencia física y una retención química que dificulta la transferencia y el transporte de sustancias de interés al agua.

En la tabla 7 se presentan los resultados obtenidos en la determinación de la liberación máxima de las distintas sustancias analizadas, su valor medio y el intervalo para un nivel de confianza del 95%. En dicha tabla se incorporan los resultados de la tabla 6 (cantidad total liberada en relación a la superficie expuesta) pero expresados en relación a masa seca de material¹. Con esta transformación se pretende contrastar los resultados derivados de ambos ensayos, para situarlos en orden de magnitud, asumiendo de antemano que no son ensayos estrictamente comparables.

Puede verse que en todos los casos los valores de R_{64}^* son entre 2 y 3 órdenes de magnitud inferiores a los potenciales de máxima liberación. Para el análisis de los resultados cabe diferenciar **dos grupos** de elementos. El primer grupo formado por **arsénico, cadmio, mercurio, níquel, selenio y estaño**, que presentaron una concentración real por debajo del límite de detección del equipo de análisis. La concentración de estos elementos en los eluatos del ensayo GLHC se encontró a niveles indetectables por el equipo, porque no formaban parte de la composición de la matriz (mezcla de áridos) o su presencia era muy limitada.

En el segundo grupo se encuentran **cobre, plomo y cinc**. En este caso la cantidad máxima que potencialmente se podría liberar sí que fue cuantificable (supera en

órdenes de magnitud el límite de detección del equipo), mientras que la cantidad que se incorporó al agua en contacto con las probetas GLHC, presentó concentraciones no medibles, inferiores al límite de detección (véase la tabla 3). Estos elementos estarían presentes en la matriz sólida pero sufrirían una retención por parte de la matriz que limitaría su incorporación al agua.

Tabla 7. Potencial máximo de liberación de sustancias peligrosas

Contaminante	Máxima disponibilidad Valor medio (mg/kg)	Intervalo del valor medio al 95% (\pm mg/kg)	R_{64}^* (mg/kg)
Aluminio	262	178,3	1.570
Antimonio	<LD	-	0,01
Arsénico	<LD	-	<0,026
Bario	591,8	32,3	0,31
Cadmio	<LD	-	<0,001
Cinc	21,2	1,8	0,01
Cobre	9,1	2,1	0,007
Cromo	<LD	-	0,003
Estaño	<LD	-	<0,009
Mercurio	<LD	-	<0,0009
Molibdeno	1,5	0,04	0,013
Níquel	<LD	-	<0,002
Plomo	1,7	0,3	0,026
Selenio	<LD	-	<0,003
Vanadio	26,2	0,6	0,071

Nota: <LD= inferior al límite de detección.

3.5. Mecanismos de lixiviación

Uno de los objetivos de los ensayos DSLT y GLHC es determinar la velocidad a la que las sustancias de interés se liberan del material monolítico o del material granular compactado y se incorporan al agua. Los mecanismos de liberación, bajo las condiciones de ensayo, son complejos y propios para cada especie química como se mostrará posteriormente. La velocidad de incorporación de sustancias peligrosas al agua se puede ver retardada por reacciones de superficie o por la precipitación de compuestos insolubles y acelerada por fenómenos de complejación o de disolución de la fase mineral. Por ello se requiere un análisis numérico de los resultados para conseguir una descripción completa de los mecanismos de incorporación. Los resultados derivados de este análisis sirven para estimar los parámetros intrínsecos del material en lo que a su capacidad de transferencia de masa se refiere (Kosson y col. (2002)), con el fin de poder calcular el término fuente en los modelos de simulación de transporte de contaminantes para los estudios de impactos y de riesgos ambientales.

El Anexo B (normativo) de la especificación técnica CEN/TS 16637-2:2014 y el Anexo D (normativo) de la norma NEN 7375:2004 "Determination of leaching of inorganic components with the diffusion test" incorporan en su contenido procedimientos para efectuar este análisis.

La primera contempla los siguientes casos:

¹ La transformación se hace mediante la expresión $R_{64}^* = R_{64} A / M_m = R_{64} A / (r V) = R_{64} / (r h)$, donde A (m²) es la superficie de la probeta, M_m (kg) es su masa, V (m³) su volumen, r (kg/m³) su densidad y h (m) su altura. Para los cálculos se ha tomado $h = 0,1$ m y $r = (2\ 250 + 2\ 190 + 2\ 240) / 3 = 2\ 230$ kg/m³.

- a) Concentraciones próximas al límite de detección:
 - Concentraciones bajas en su conjunto (Sección B.3.1)
 - Lavado superficial seguido de concentraciones bajas (B.3.2)
- b) Liberación controlada por difusión
 - Difusión pura (B.4.1)
 - Difusión precedida por lavado superficial (B.4.2)
 - Difusión seguida de agotamiento (B.4.3)
 - Difusión precedida por lavado superficial y seguido de agotamiento (B.4.4)
- c) Liberación controlada por disolución (B.5)
- d) Otros casos
 - Mecanismo de liberación no identificado (B.6.1)
 - Mecanismo no identificado precedido por lavado superficial (B.6.2)
 - Mecanismo no identificado seguido de agotamiento (B.6.3)
 - Mecanismo no identificado precedido por lavado superficial y seguido de agotamiento (B.6.4)

Los criterios de clasificación en cada uno de estos casos se basan en la comparación entre diferentes promedios de las concentraciones de los eluatos y, en algunos casos, también en la variación del pH.

Aplicando estos criterios a los resultados del ensayo ejecutado, se puede afirmar que:

- **bario, molibdeno, cloruro, sulfato y sodio** presentan patrones de difusión pura en su incorporación al agua.
- **magnesio**, de difusión precedida de lavado superficial.
- **aluminio y vanadio**, de mecanismo no identificado.
- **calcio**, disolución.

El Anexo D de la norma **NEN 7375:2004** aplica un procedimiento similar para el análisis de resultados, pero no exactamente igual al de la especificación **CEN/TS 16637-2:2014**. En el análisis se contempla la clasificación del mecanismo de liberación para cada etapa del ensayo, a partir de las pendientes de cada tramo de la curva $R_i - t_i$ para aquellas sustancias de interés cuyos eluatos presentan concentraciones significativamente más altas que el límite de detección del equipo.

De acuerdo con esta norma, el conjunto de los datos se distribuyó en seis grupos: **Inicio** (1-4), **medio** (2-5) y (3-6), **final** (4-7) y (5-8) y el **conjunto** (2-7). A través de estas agrupaciones se identificaron los periodos temporales en los que la incorporación al agua de sustancias de interés respondió a un mecanismo **puro de difusión**. En la tabla 8 se muestran los resultados del análisis de regresión efectuado y la asignación del mecanismo de liberación implicado en cada intervalo de tiempo considerado. Se han contemplado tres mecanismos: **lavado** de superficie (para los grupos 2-7 y 1-4) y **consumo** (para el resto de los grupos) cuando la pendiente presentó un valor inferior a 0,35, la **difusión** cuando el valor se encontró entre 0,35 y 0,65 y la **disolución** para valores superiores a 0,65.

De las sustancias analizadas, el **magnesio** fue la única especie química cuya presencia en el eluato se explica por la actuación de un único mecanismo, la **difusión**. Para el resto, el proceso de lixiviación fue más complejo y respondió a una combinación de mecanismos. La incorporación del calcio al agua no respondió a fenómenos relacionados con gradientes de concentración química generados en los poros a lo largo de las 8 renovaciones efectuadas. Este comportamiento diferencial en relación al magnesio cabe ser atribuido a que la mezcla de árido de EAHE y caliza proporciona fases minerales de solubilidad y accesibilidad diferente al agua, de ahí que el mecanismo que explica la incorporación del calcio sea el lavado de superficie y el consumo.

El objetivo último del análisis de resultados que incluye la norma NEN 7375:2004 en su anexo D es identificar los periodos temporales en los que la incorporación de sustancias de interés al agua responde a un mecanismo puro de difusión. A partir únicamente de esos resultados se determinan propiedades intrínsecas de la matriz que forman parte de la

Tabla 8. Mecanismos implicados en la incorporación de sustancias de interés al agua

Grupo	Aluminio		Bario		Molibdeno		Vanadio		Sulfato	
	a	M	a	M	a	M	a	M	a	M
2-7	0,01	LAV	0,43	DIF	0,49	DIF	1,03	DIS	0,33	LAV
5-8	0,52	DIF	0,40	DIF	0,68	DIS	1,16	DIS	0,39	DIF
4-7	0,03	CON	0,51	DIF	0,65	DIF	1,11	DIS	0,32	CON
3-6	0,12	CON	0,42	DIF	0,35	DIF	1,32	DIS	0,36	DIF
2-5	0,02	CON	0,38	DIF	0,38	DIF	0,65	DIF	0,29	CON
1-4	0,38	DIF	0,74	DIS	0,44	DIF	0,86	DIS	0,47	DIF

Grupo	Magnesio		Calcio		Sodio		Cloruro		Nota:
	a	M	a	M	a	M	a	M	
2-7	0,42	DIF	0,01	LAV	0,59	DIF	0,63	DIF	a valor pendiente M mecanismo LAV lavado superficie DIF difusión DIS disolución CON consumo
5-8	0,48	DIF	0,28	CON	0,74	DIS	0,45	DIF	
4-7	0,45	DIF	0,32	CON	0,68	DIS	0,42	DIF	
3-6	0,58	DIF	0,08	CON	0,68	DIS	0,76	DIS	
2-5	0,36	DIF	0,25	CON	0,48	DIF	0,67	DIS	
1-4	0,38	DIF	0,76	DIS	0,52	DIF	0,78	DIS	

caracterización del material frente a la lixiviación (coeficientes de difusión de las sustancias de interés, la tortuosidad y la capacidad de retención química exhibida por la matriz).

3.6. Extrapolación para períodos de liberación más largos

En el anexo A de la especificación técnica CEN/TS 16637-1:2014, se indica que los métodos de ensayo propuestos presentan distintas aplicaciones. Sirven para estimar la liberación potencial de sustancias peligrosas presentes en los productos de construcción para proceder a la **declaración** exigida por el marcado CE. Estos métodos deberían servir también como herramientas y punto de partida para establecer un conjunto consistente de criterios regulatorios.

Para el proceso de evaluación de impacto ambiental y para los estudios de riesgos ambientales se necesita un modelo matemático de transporte de contaminantes que incluya un submodelo para el cálculo del “término fuente”, es decir, de las características de la entrada de contaminantes en el sistema modelizado. Dicho submodelo debe tener en cuenta los mecanismos de liberación en el escenario concreto que más se asemeje al tipo de uso previsto (p.e., subbalasto de una vía férrea, base o subbase de una carretera, etc.) y en las condiciones ambientales previstas en su uso (pluviosidad, temperatura, duración, erosión, etc.)

Un elemento fundamental para este cálculo es adoptar una hipótesis para **extrapolar** los resultados del ensayo. Se trata de predecir la cantidad acumulada que se libera por unidad de superficie desde la puesta en obra del material hasta cualquier instante durante el período de servicio de la obra, que puede ser del orden de 100 años.

Como aproximación a esto, el anexo B de la especificación técnica CEN/TS 16637-2:2014 proporciona unas fórmulas para extrapolar la cantidad liberada acumulada por unidad de superficie en la probeta si el ensayo se prolongara durante un tiempo $t_E > 64$ días.

Existe una fórmula para cada uno de los mecanismos de liberación contemplados, que son los mencionados en el apartado 3.5 del presente artículo. En tabla 9 se exponen las fórmulas aplicables a cada uno de los contaminantes de la muestra ensayada.

Tabla 9. Fórmulas de extrapolación de la cantidad liberada acumulada por unidad de superficie (R_{tE} , mg/m²) hasta el instante $t_E > 64$ días

Analito	Fórmula de extrapolación
Aluminio	$R_{tE} = 51,0 t_E^{1/2}$
Bario	$R_{tE} = 9,69 t_E^{1/2}$
Molibdeno	$R_{tE} = 0,426 t_E^{1/2}$
Vanadio	$R_{tE} = 1,69 t_E^{1/2}$
Cloruros	$R_{tE} = 1 028 t_E^{1/2}$
Sulfatos	$R_{tE} = 107,9 t_E^{1/2}$
Sodio	$R_{tE} = 1 798 t_E^{1/2}$
Calcio	$R_{tE} = 1 336 t_E^{1/2}$
Magnesio	$R_{tE} = 15,0 + 10,83 (t_E^{1/2} - 1)$

4. CONCLUSIONES

Una vez analizados los resultados obtenidos en el ensayo GLHC aplicado a la mezcla de árido procedente de

escorias de acería de horno eléctrico y árido calizo, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La **mezcla de escoria de acería y caliza** con granulometría inferior a 4 mm es un sustrato **adecuado** para la aplicación del ensayo **GLHC**.
 1. La mezcla consigue la permeabilidad adecuada para el desarrollo de un ensayo basado en la **difusión** como mecanismo fundamental de incorporación de sustancias peligrosas al agua.
 2. Bajo las condiciones de ejecución descritas, la mezcla se comporta como un material **monolítico cilíndrico**, una de cuyas superficies queda expuesta al contacto con el agua.
 3. La estabilidad del pH y del potencial de óxido-reducción de los eluatos derivados de las ocho renovaciones a las que se sometieron las probetas permite afirmar que el **pH** y la **condiciones redox no** han intervenido en el proceso de elución de las sustancias peligrosas analizadas. La fuerza impulsora del proceso de elución ha sido fundamentalmente el gradiente de concentración generado entre la matriz y el agua en contacto con la probeta.
- Las sustancias peligrosas analizadas mostraron patrones diferentes de incorporación al agua. Los **distintos mecanismos identificados** permiten predecir evoluciones temporales diferentes para cada contaminante analizado, acordes con su solubilidad, difusividad y presencia en la matriz sólida. Esta información es básica cuando se trata de predecir el comportamiento ambiental en condiciones reales de utilización de los productos de construcción, y en especial, cuando estos en origen son residuos o subproductos.

5. BIBLIOGRAFÍA

Bialucha, R., Merkel, T. y Motz, H. (2011). “European environmental policy and its influence on the use of slag products”. En: 2nd International Symposium on the valorisation of slags and other high temperatura residues. Editado por: Peter Tom Jones, Yiannis Pontikes, Jan Else, Ozlem Cizer, Luc Boehmen, Tom Van Gerven, Daneel Geysen, Muxing Guo y Bart Blanpain. Leuven, Bélgica. 18-20 abril de 2011. Recuperado de <http://www.slag-valorisation-symposium.eu/2011/index.php>

Crank, J. (1975). *Non-Fickian Diffusion*. En: The Mathematics of Diffusion. Oxford University Press, 1975, pp 254-257. ISBN: 0 19 8533446.

Kosson, D.S, van der Sloot, H.A., Sanchez, F. y Garrabrants, A.C. (2002). *An integrated framework for evaluating leaching in waste management and utilization of secondary materials*. *Environmental Engineering Science*. May 2002, 19(3): 159-204.

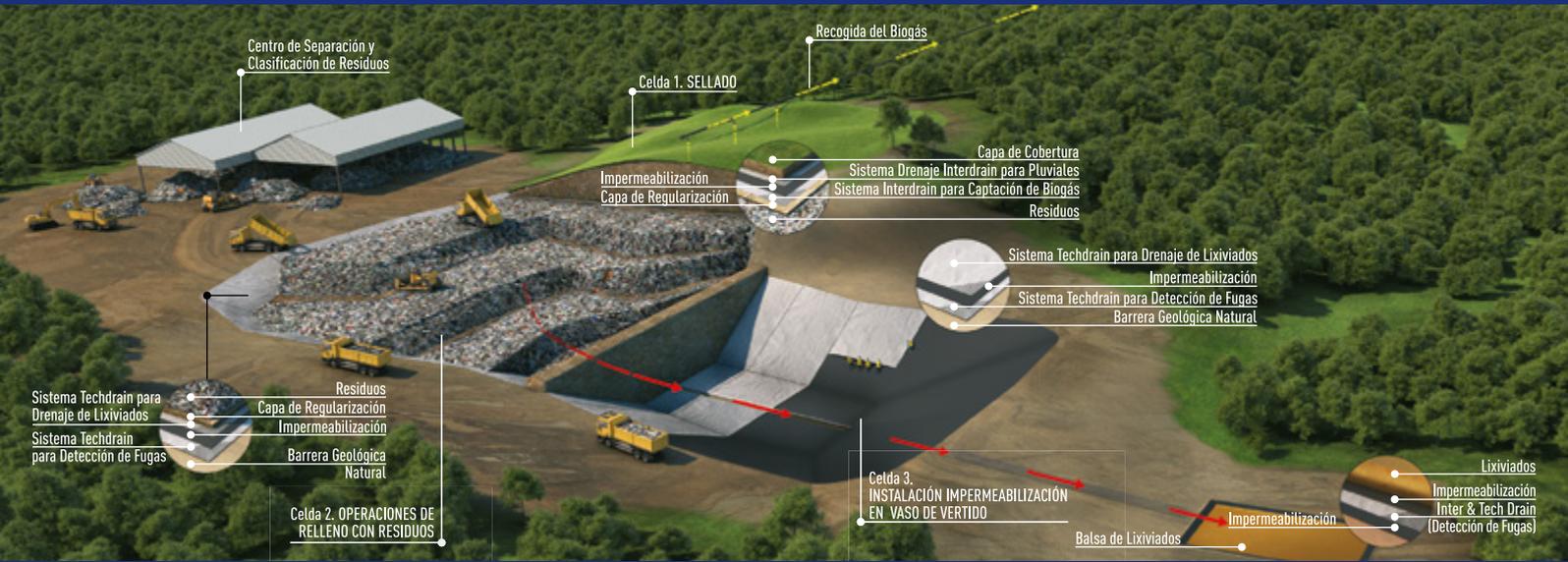
Moral, A. y Fernández, S. (2013). *Especificaciones sobre sustancias peligrosas reguladas en las normas armonizadas de áridos*. Carreteras.187 (2013) pp 18-30.

Soil Quality Regulation (2006). *Preliminary draft of the Soil Quality Regulation*. Version 6.0-10 october 2006. 2006 05557 NL. Recuperado de http://ec.europa.eu/enterprise/tris/index_es.htm.

VERTEDEROS

DRENAJE DE AGUAS PLUVIALES
CAPTACIÓN DE BIOGÁS

DRENAJE DE LIXIVIADOS
DETECCIÓN DE FUGAS



TECHDRAIN

