



TERRATEST
MEDIOAMBIENTE

Envejecimiento de las Capas de Sellado en Vertederos Clausurados

Javier Moreno

Director de División de Obras y Proyectos

III Congreso Internacional
de MTD en vertedero y suelos contaminados

“Sellado, recuperación ambiental, usos y control postclausura de vertederos y suelos contaminados”

Palacio Euskalduna – Bilbao
21 y 22 de Noviembre de 2012



índice (1)

- **1. Objeto del Sellado**
- **2. Alternativas al Sellado**
- **3. Sistemas de impermeabilización**
- **4. Arcilla compactada (CCL)**
 - 4.1. Compactación
 - 4.2. Fisuración y desecación
 - 4.3. Flujo a través de CCL
 - 4.4. Flujo anual a través de CCL
- **5. Suelo + Bentonita (BES)**
 - 5.1. Permeabilidad del suelo enriquecido con bentonita
- **6. Geocompuesto de Bentonita (GCL)**
 - 6.1. Desecación y agrietamiento del GCL
 - 6.2. Intercambio catiónico en GCL's
 - 6.3. Resultados de exhumaciones de GCL's
 - 6.4. Flujo a través del GCL

índice (2)

- **7. Barrera mineral Bentonita + Polímero (Trisoplast®)**
 - 7.1. Intercambio catiónico en Trisoplast®
 - 7.2. Evaluación de obras con Bentonita + Polímero
 - 7.3. Perfil de sellado del vertedero
 - 7.4. Inspección de la barrera mineral
 - 7.5. Evolución de la saturación “in situ”
 - 7.5. Resultados de la exhumación de capas de Bentonita+Polímero
- **8. Geomembranas Poliméricas (PEAD)**
 - 8.1. Puesta en obra
 - 8.2. Riesgo de la puesta en obra
 - 8.3. Estadísticas de punzonamientos accidentales
 - 8.4. Environmental Stress Cracking – ESC
- **9. Comparativa de barreras minerales**
- **10. Conclusiones**

1. Objeto del Sellado

- La protección de la salud de las personas y el medio ambiente:
 - Impidiendo o limitando la infiltración de las aguas pluviales y minimizando, por tanto, la generación de nuevos frentes de lixiviación.
 - Mejorando la calidad de las aguas superficiales al impedir su contacto con los residuos depositados.
 - Impedir la combustión interna de los residuos y evitar la emisión de olores y gases contaminantes, y favorecer la captación, tratamiento o valorización del biogás, en el caso de vertederos de residuos urbanos.
- La estabilización de la superficie.
- La integración paisajística y la minimización de los procesos erosivos.
- Mantener sus condiciones de permeabilidad, estabilidad y resistencia mecánica, a medio y largo plazo – periodo post-clausura (30 años).

2. Alternativas al sellado

- Vertedero de residuos industriales o peligrosos: No hay alternativa
- Vertederos de residuos sólidos urbanos: Permitir la entrada de agua y aire de forma controlada para acelerar los procesos de descomposición.
 - A descartar por:
 - Incremento en la producción de lixiviados → más tratamiento.
 - Difícil control de olores.
 - Problemas con el aprovechamiento del biogás.
 - Plazo más dilatado para la reutilización del terreno.
 - Problema: ¿cuántos años está “vivo” el vertedero?
- Posibilidad: aceleración de los procesos de tratamiento mediante un bioreactor aerobio (inyección de aire) o anaerobio, con reintroducción controlada de lixiviados (wet landfill).

3. Sistemas de impermeabilización

- **Barreras Minerales**
 - Arcillas compactadas (*Compacted Clay Liners – CCL*).
 - Suelo + Bentonita (*Bentonite Enriched Soils – BES*).
 - Geocompuesto de Bentonita (*Geosynthetic Clay Liners – GCL*).
 - Barrera mineral Bentonita + Polímero (*tipo Trisoplast®*)
- **Geomembranas poliméricas:**
 - Polietileno de Alta Densidad (*PEAD o HDPE*)
 - Otras:
 - Polietileno de Baja Densidad (*PELD o LHPE*)
 - Policloruro de Vinilo Flexible (*PVC-P*)
 - Polipropileno Flexible (*FPP*)

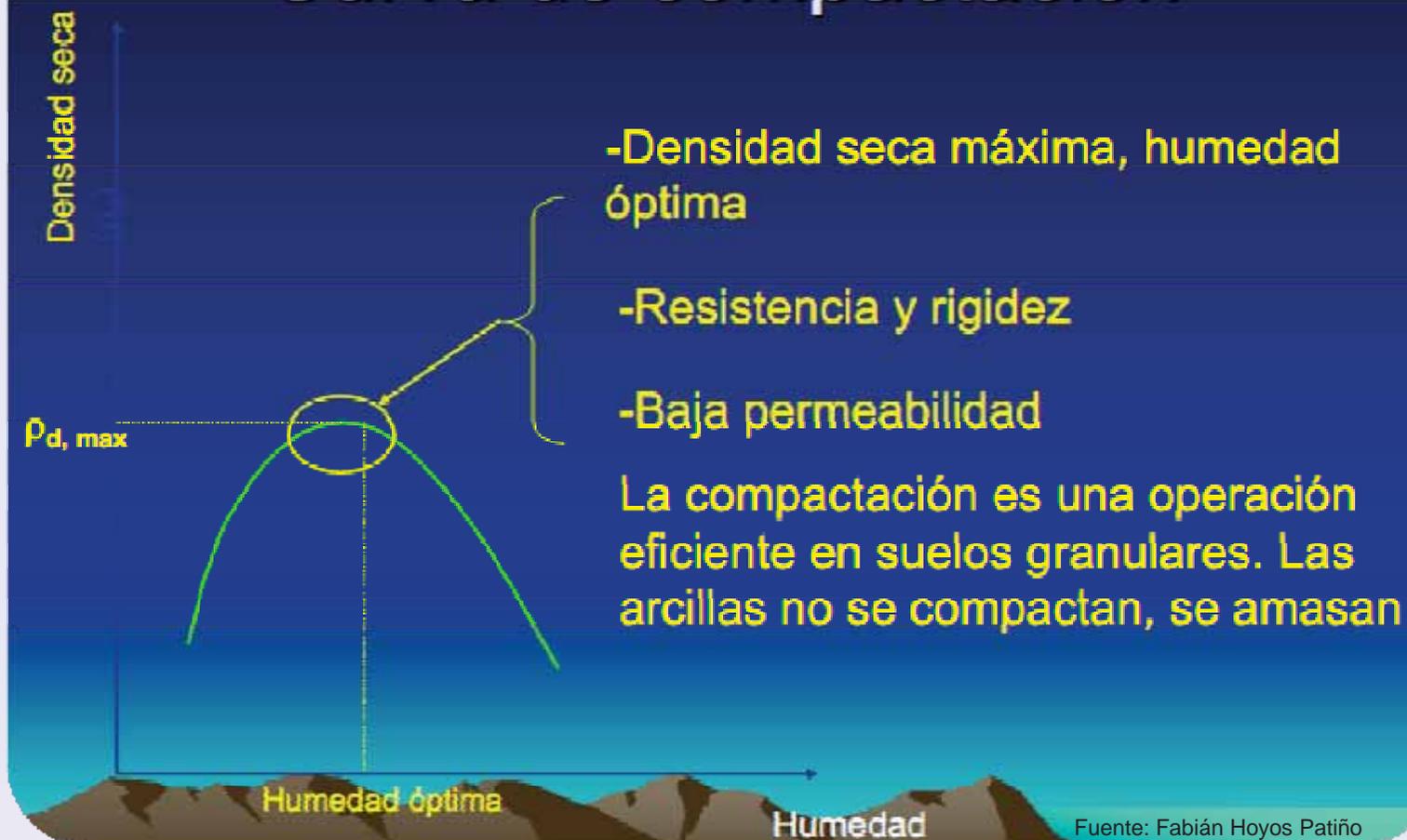
4. Arcilla Compactada (CCL)

- Requiere un elevado volumen de material. Capas con espesores de 0,5 a 1,5 m.
- Problemas de homogeneidad del préstamo, aún con arcillas de la misma procedencia.
- Se requiere el “desterronamiento” previo del material.
- La necesidad de extenderla y compactarla en varias tongadas retrasa la puesta en obra.
- Precauciones con el sol y la lluvia.
- Una buena compactación sólo se consigue con la humedad óptima (permeabilidad (K) 10^{-8} a 10^{-10} m/s)
- Serias limitaciones de compactación en taludes.



4.1. Compactación de las arcillas

Curva de compactación

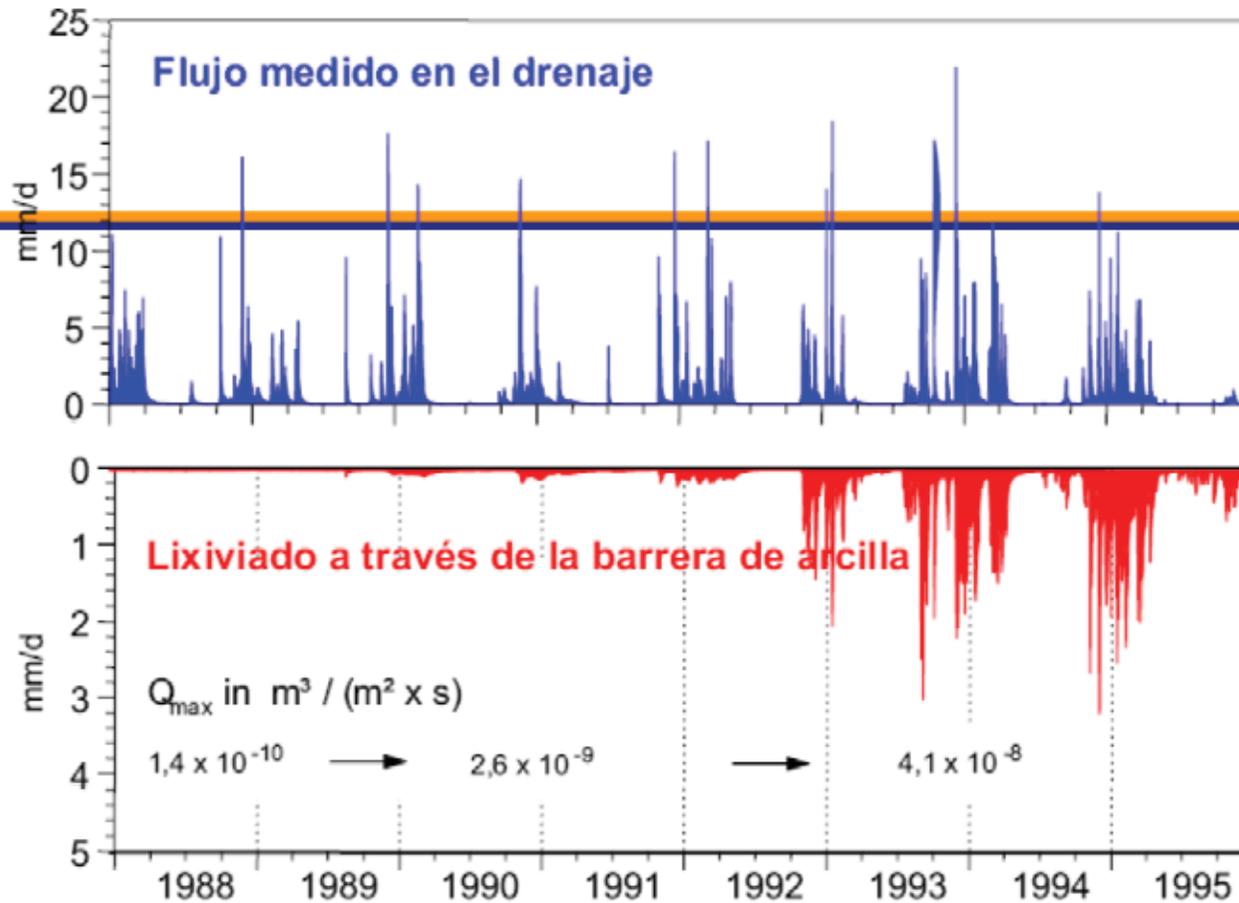


4.2. Fisuración y desecación de las arcillas

- Existe muy poca conciencia del problema, puesto que queda oculto.
- La fisura abierta, jamás se cierra, y se genera por:
 - Asentamiento.
 - Desecación:
 - Ciclos atmosféricos.
 - Temperatura de los residuos.
 - Desarrollo radicular.
- La fisuración favorece la penetración de las raíces, que son más el resultado que la causa.
- No soporta asientos diferenciales.
- La conductividad hidráulica se puede incrementar hasta dos órdenes de magnitud (K) 10^{-6} a 10^{-8} m/s (media 10^{-7} m/s).



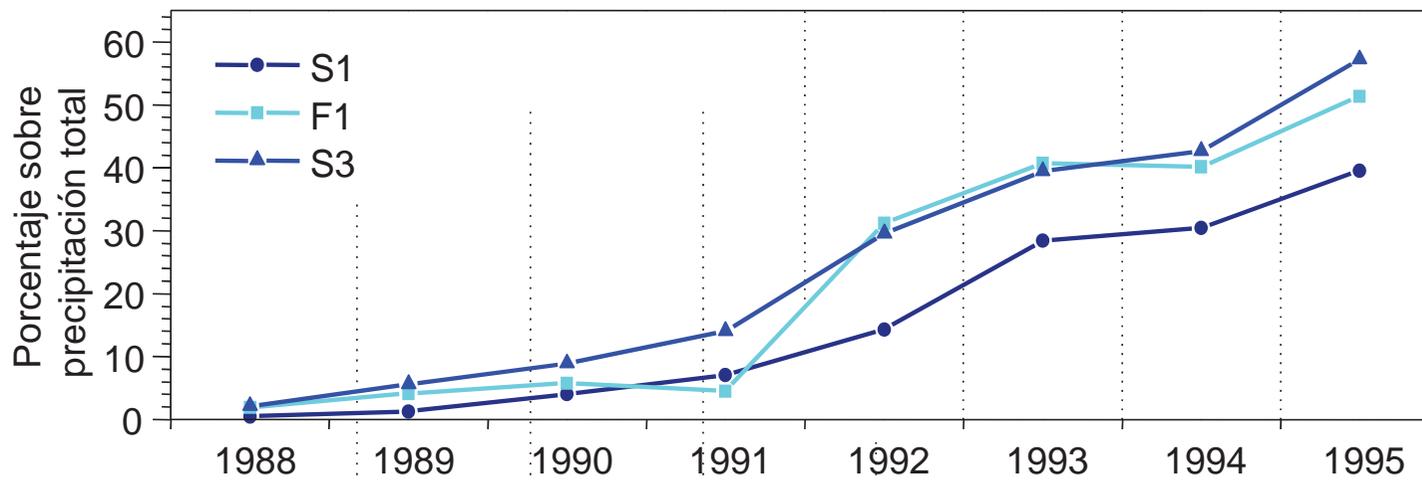
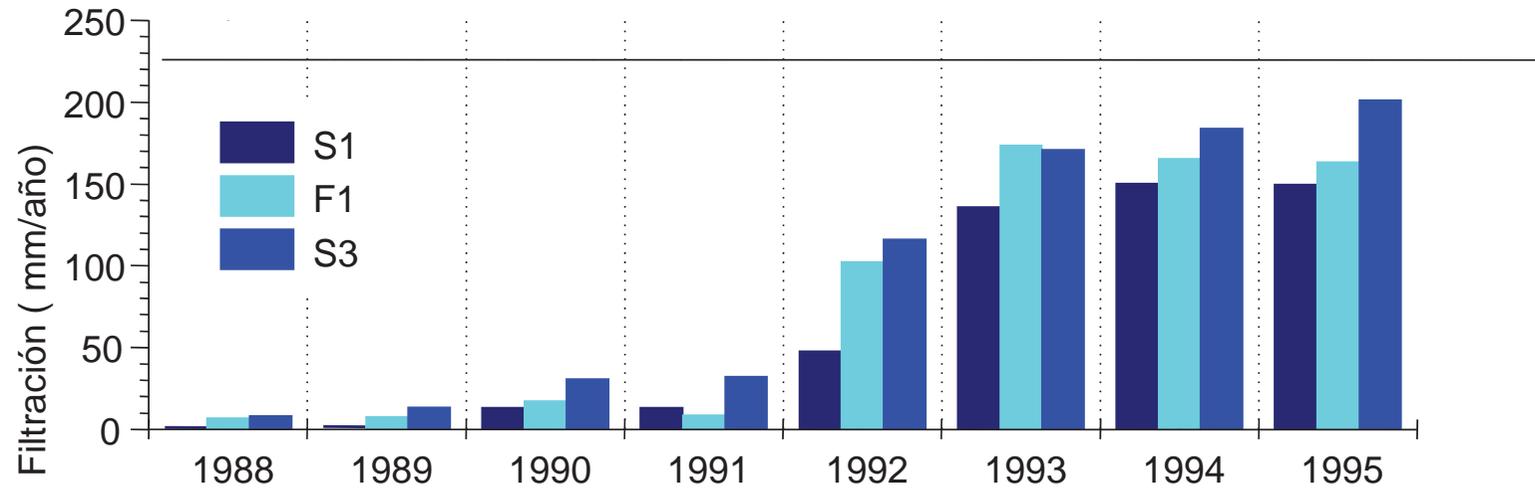
4.3. Flujo a través de CCL



Melchior



4.4. Flujo anual a través de CCL



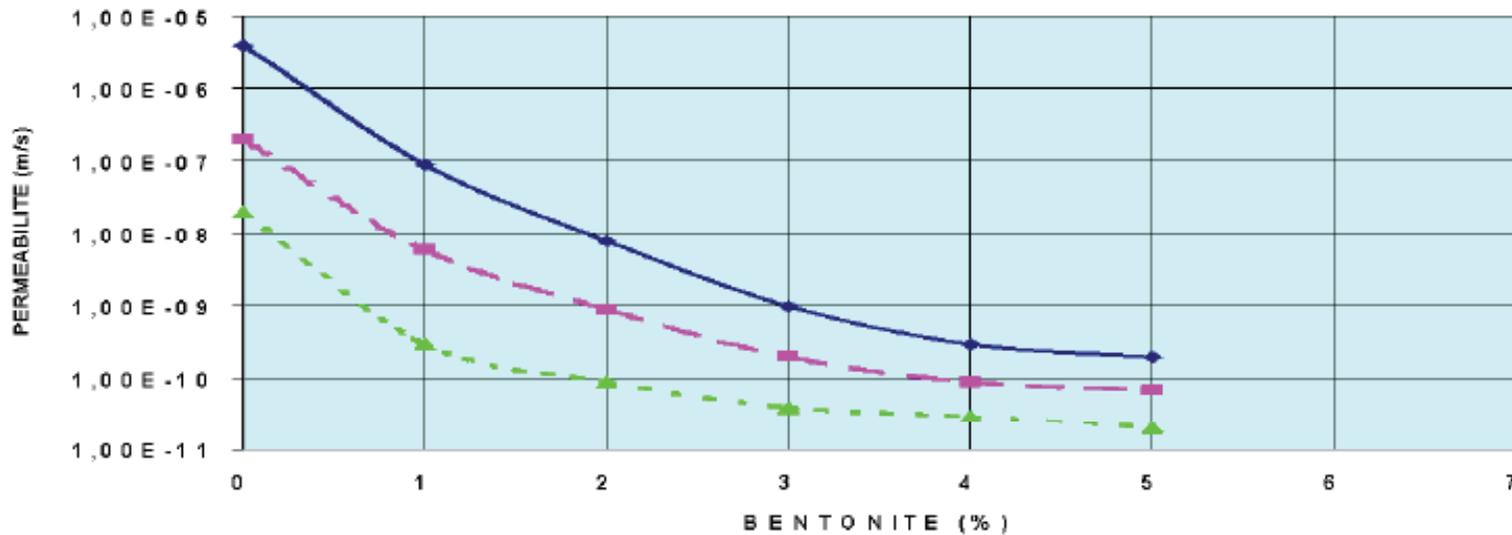
Melchior 1998, 2001

5. Suelo + Bentonita (BES)

- Es una evolución de las arcillas compactadas.
- El hinchamiento de la bentonita permite el cierre de las fisuras y le confiere menor permeabilidad.
- Puede aplicarse en suelos locales con bajas exigencias.
- La puesta en obra es dificultosa, requiere extendido y compactación posterior, en condiciones óptimas de humedad.
- No soporta asientos diferenciales.
- Control de fabricación es complicado salvo en planta de amasado.
- Sellado a gases, sólo si está humedo.



5.1. Permeabilidad de Suelo + Bentonita



- Espesor y contenido en bentonita:
 - Capa de 50 cm - 5% de bentonita.
 - Capa de 10 cm - 13% de bentonita.
- Es muy sensible a la desecación y al intercambio catiónico en suelos calcáreos(Ca^{++}):
 - Pérdida de hinchamiento.
 - Incremento de la permeabilidad: (K) 10^{-10} m/s \rightarrow 10^{-8} m/s.

6. Geocompuesto de Bentonita (GCL)

- Contenido de Bentonita-Na $>5.000 \text{ g/m}^2$.
- Facilidad de puesta en obra.
- Precio muy competitivo, en comparación con el resto de barreras minerales.
- Su escaso espesor (6 a 10 mm) obliga a utilizar valores poco realistas en el cálculo hidráulico.
- Problemas de estabilidad en taludes, debido a su baja resistencia al corte (UNE 14196).
- Rápido e importante deterioro de la permeabilidad por intercambio catiónico (Ca^{++})
- Sellado a gases: sólo si está húmeda.

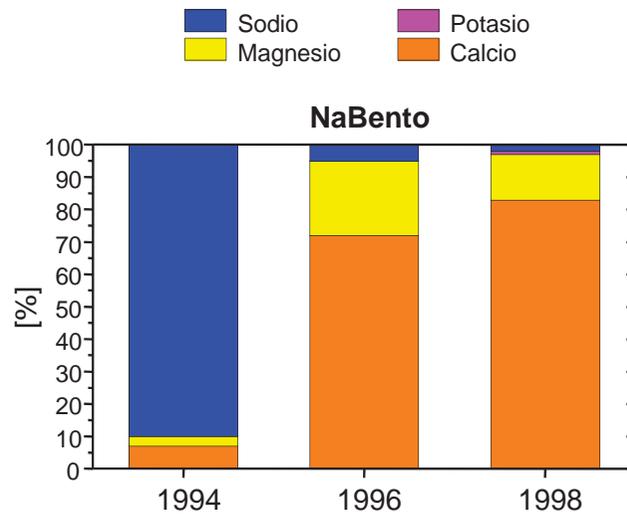
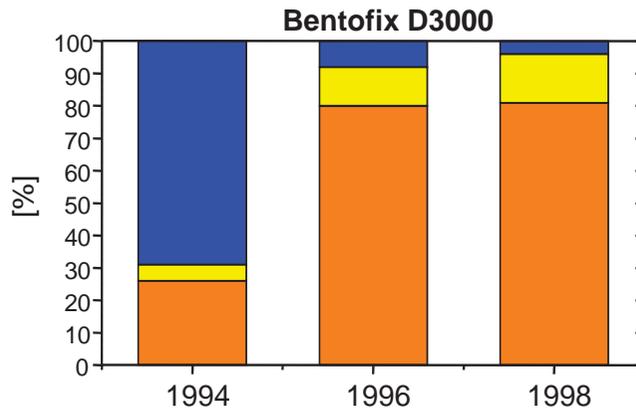


6.1. Deseccación y agrietamiento de GCL

- Al igual que las arcillas, existe poca concienciación del problema.
- Problemas de desecación y fisuración por estrés hídrico.
- La baja permeabilidad sólo se obtiene al 100% de humedad.
- El proceso se ve potenciado por el intercambio catiónico, con la consiguiente pérdida de hinchamiento.
- Migración de la bentonita en taludes.
- En muchos casos, el geocompuesto de bentonita aparece invadido por las raíces de las plantas.

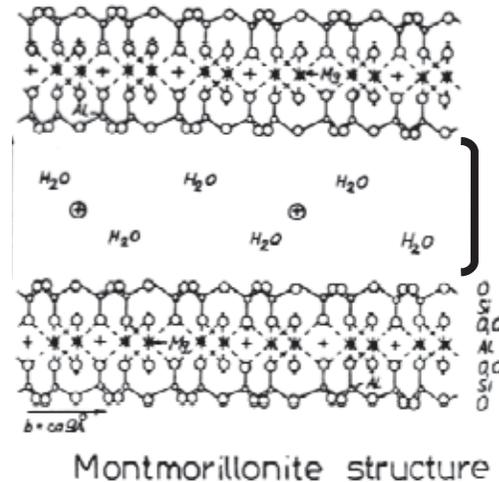


6.2. Intercambio catiónico en GCL's (1)



Melchior 1998, 2002

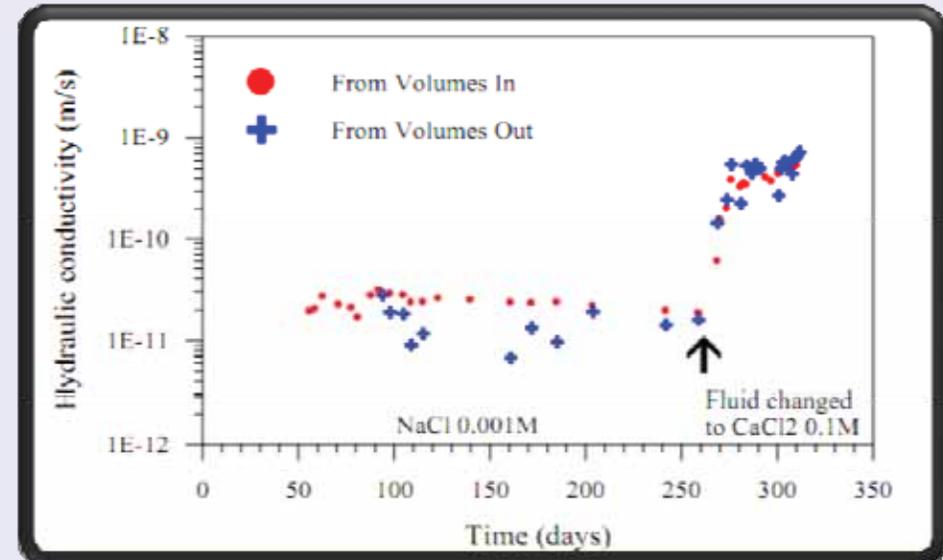
Sustitución del ión monovalente Na^+ de la bentonita sódica por el ión bivalente Ca^{++} , del suelo de cobertura.



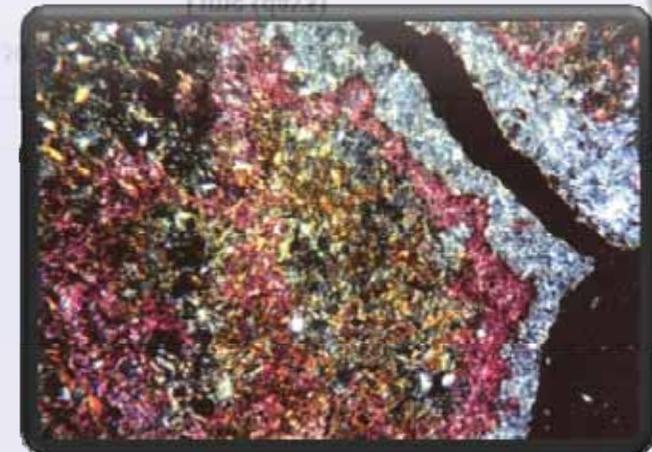
6.2. Intercambio catiónico en GCL's (2)

ESTUDIO ALTERNATIVAS DE SELLADO DE CENIZAS CEMENTADAS PROCEDENTES DE INCINERADORA DE RESIDUOS

- Pérdida de la capacidad de hinchamiento.
- Aumento del riesgo de desecación y de fisuración o "cracking".
- Merma en la capacidad de re-sellado de las juntas y fisuras.
- Como resultado hay un incremento de la permeabilidad a valores que oscilan entre 10^{-6} y 10^{-8} m/s (originalmente 10^{-11} m/s) en periodos de tiempo reducidos.



COSTRA DE CARBONATO



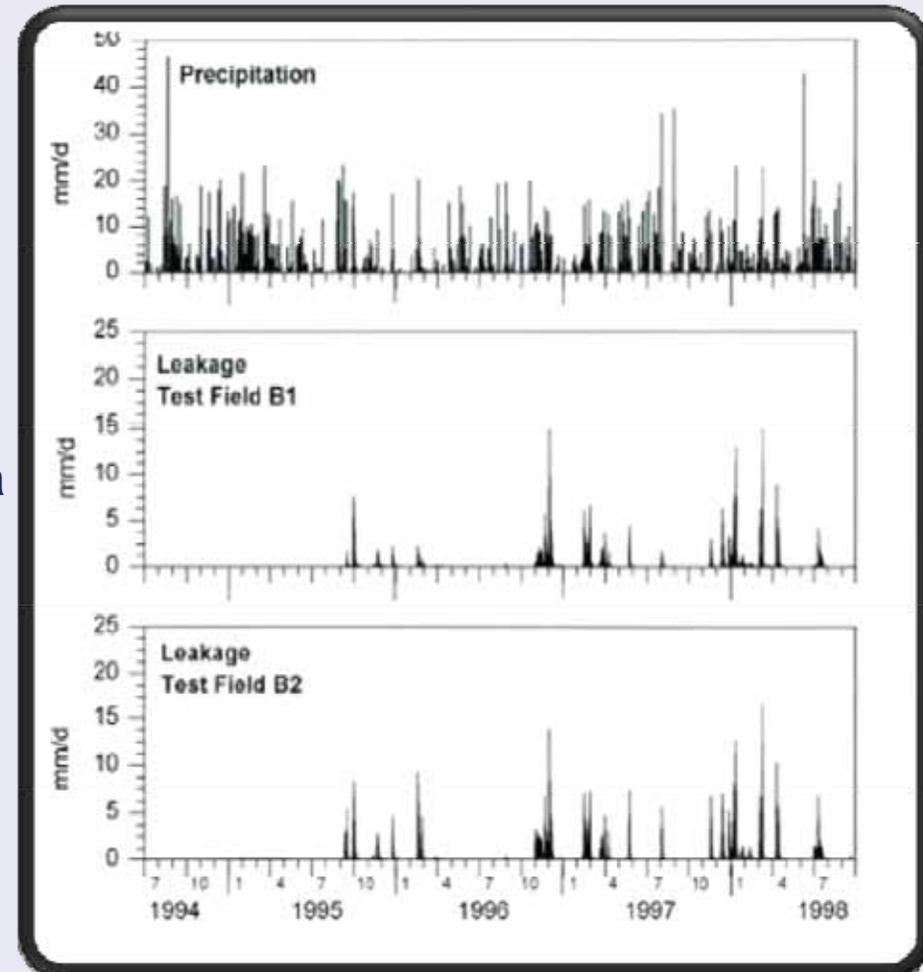
6.3. Resultados de exhumaciones de GCL´s (Meer, S.R., Benson, C.H., 2007)

Vertedero	Antigüedad	Permeabilidad (m/s)
i (media de 8 puntos)	4,6 años	$3,9 \cdot 10^{-7}$ m/s
ii (media de 4 puntos)	11,1 años	$6,2 \cdot 10^{-10}$ m/s
iii (media de 4 puntos)	4,1 años	$1,1 \cdot 10^{-6}$ m/s
iv (media de 4 puntos)	5,6 años	$4,7 \cdot 10^{-7}$ m/s
Media (20 puntos)	6,35 años	$4,85 \cdot 10^{-7}$ m/s
GCL nuevo I	0 años	$1,2 \cdot 10^{-11}$ m/s
GCL nuevo II	0 años	$1,7 \cdot 10^{-11}$ m/s

6.4. Flujo a través del GCL

(Experiencia en el Vertedero de Hamburgo)

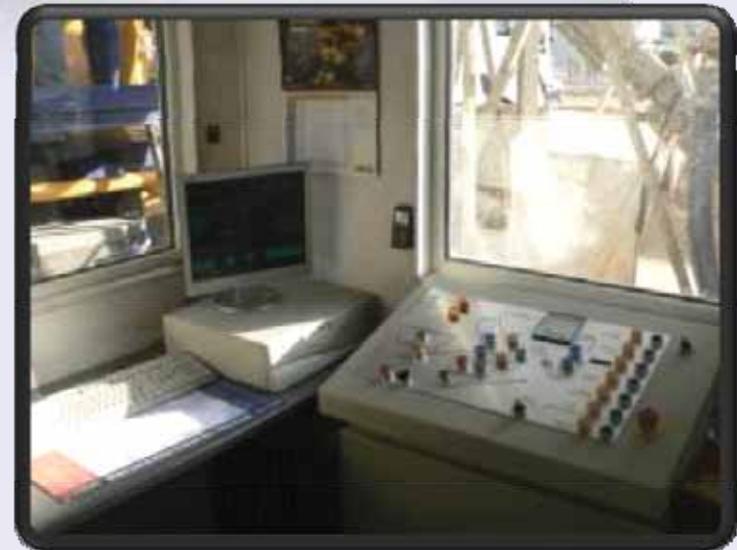
- El incremento de filtraciones se detecta después de un periodo muy seco.
- El proceso se ve favorecido por un importante reemplazamiento del Na^+ por iones Ca^{++} .
- La capacidad de hinchamiento se había reducido a valores típicos de la bentonita cálcica ($k \ll 10^{-8}$ m/s).
- El GCL protegido con una geomembrana presentaba un mayor índice de hinchamiento, menor intercambio iónico y menor permeabilidad.



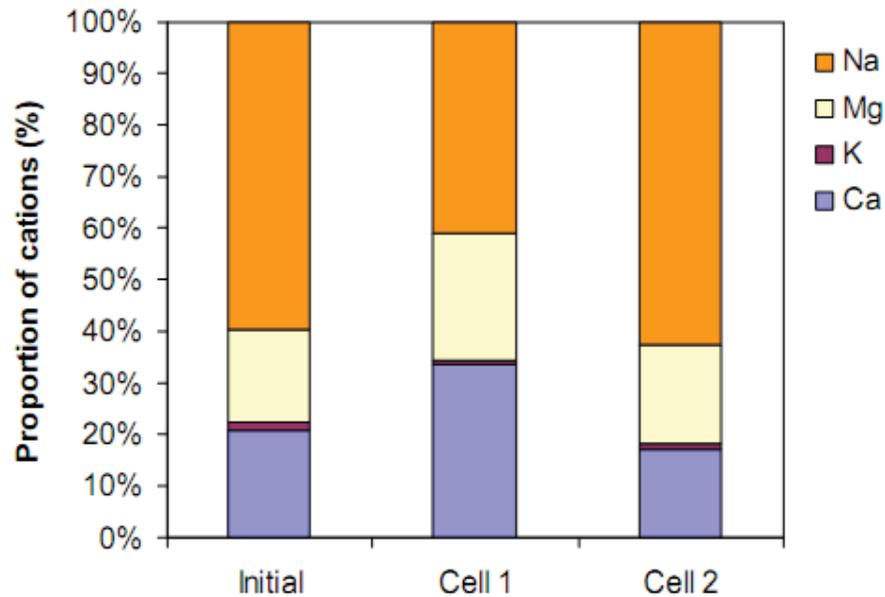
Melchior , 2002

7. Barrera mineral Bentonita + Polímero (Trisoplast®)

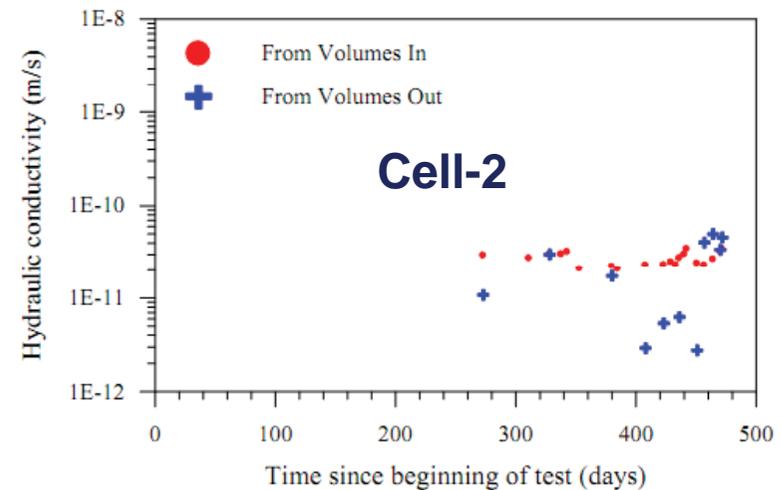
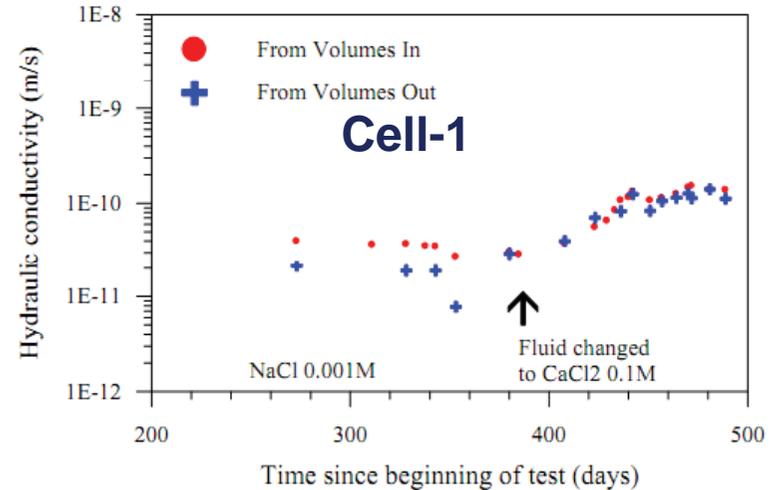
- Mezcla de arena (88,3%), bentonita (11,4 %) y polímero (0,3%) especialmente formulado, fabricada en una planta de amasado.
- Sobrada capacidad hidráulica con espesores superiores a 5 cm.
- Intercambio catiónico solucionado gracias al polímero.
- Buen comportamiento frente a asientos diferenciales.
- Fácil compactación y rápida ejecución (2.000 m²/día).
- Solución simple en puntos singulares.
- Precio elevado, hoy por hoy bajo Patente en régimen de monopolio (Trisoplast Mineral Liners).



7.1. Intercambio iónico en Trisoplast®



En la Cell-1 se incrementa la relación Ca^{++}/Na^{+} , como consecuencia del ataque químico, y como consecuencia aumenta ligeramente la permeabilidad de $3 \cdot 10^{-11}$ a $1 \cdot 10^{-10}$ m/s.



7.2. Evaluación de obras con Trisoplast®

(Construidas entre 1995-1996) Alterra, 2001 (Uni Wageningen NL) and Melchior & Wittpohl (Hamburg)

Investigación:

- Raíces.
- Fisuración.
- Permeabilidad.
- Intercambio catiónico.



Vertedero VBM Rotterdam

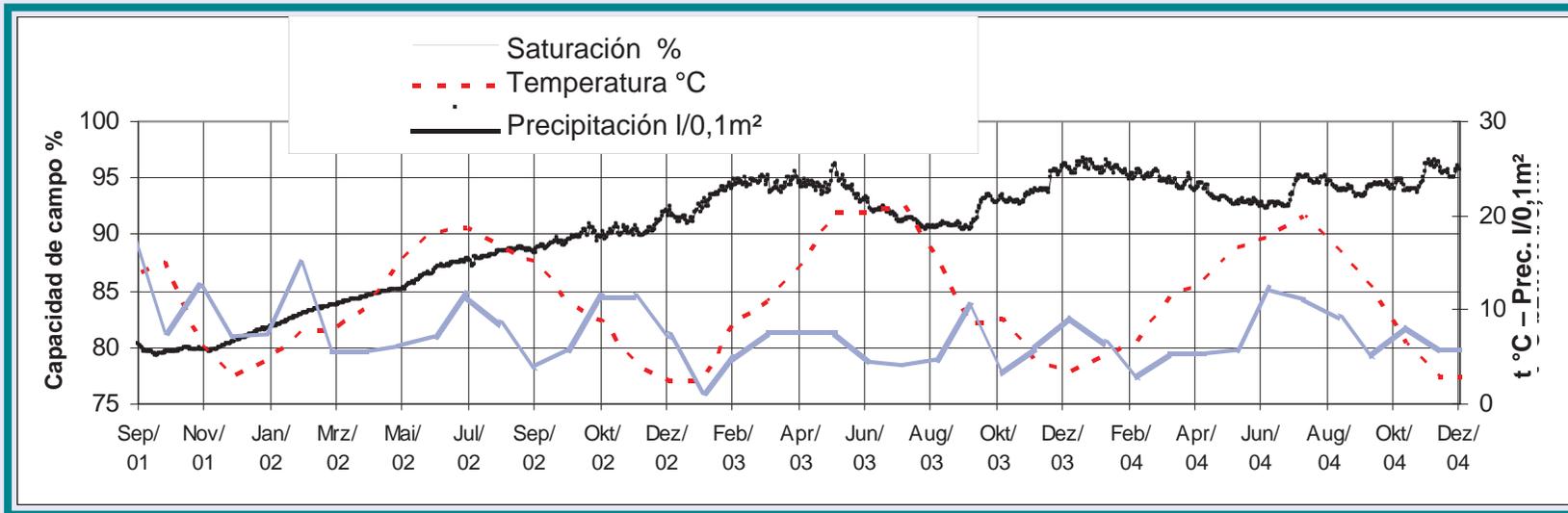
7.3. Perfil de sellado del vertedero



7.4. Inspección de la barrera mineral

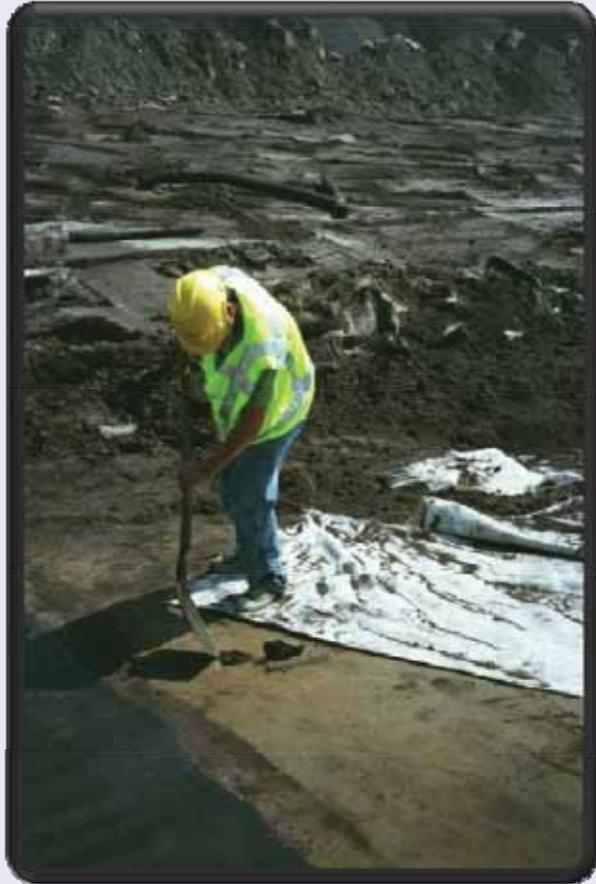


7.5. Evolución de la saturación “in situ”



Saturación no influenciada por la temperatura o la precipitación del agua de lluvia

7.6. Exhumación de capas de Trisoplast®



VERTEDERO	EDAD	PERMEABILIDAD (m/s)
EUR 1	6 años	$2,6 \times 10^{-11}$
EUR 2	6 años	$1,3 \times 10^{-11}$
VOP 3	5 años	$1,6 \times 10^{-11}$
ALM 4	5 años	$1,5 \times 10^{-11}$
ALM 5	5 años	$4,3 \times 10^{-11}$
SOE 6	5 años	$2,1 \times 10^{-11}$
Trisoplast® nuevo	0	$2,6 \times 10^{-11}$

8. Geomembranas poliméricas (PEAD)

- Se trata de láminas fabricadas en material termoplástico, que poseen buenas propiedades mecánicas, gran inercia química, sin polaridad, no adsorben humedad, de excelente aislamiento eléctrico, inodoro e inerte.
- El polietileno es el polímero más popular y, concretamente, el polietileno de alta densidad (PEAD) el que mejores resultados ha arrojado en su aplicación en vertederos.
- Son materiales que se deben adoptar como revestimiento artificial impermeable para proteger la barrera mineral, no como sustituto de la misma.
- Es un complemento a las barreras minerales.



8.1. Puesta en obra



8.2. Riesgos de puesta en obra del PEAD

- Alta vulnerabilidad frente a las perforaciones y daños puntuales, de deben proteger con geotextiles.
- Elevada sensibilidad a la calidad de la puesta en obra.
 - Materiales punzantes de la sub-base.
 - Vertido de gravas, de la capa de drenaje de aguas de infiltración.
 - Sellado de conductos.
- Soldaduras mal ejecutadas.



8.3. Punzonamientos accidentales del PEAD

Bonaparte and Gross 1990

- Alta Calidad de ejecución: 2 a 3 perforaciones/ha
- Media del Estudio: 14 perforaciones/ha
- Flujo medio de 200 litros/ha-día (73 m³/ha-año)

Hruby & Barrie (Eurogeo5- 2012)

- Presentan datos de 276 instalaciones (3.000.000 m²)
- 25 % de las fugas son debidas a fallos de instalación
- 75 % agresiones mecánicas posteriores.
- Analizan 6 obras (7.000 a 132.000 m²)
- Puntos de fuga por ha oscilan entre 14 y 142 (media 73)

10/10/2002

8.4. Environmental Stress Cracking - ESC (1)

- Se produce al someter al polietileno a tensiones poliaxiales en contacto con el medio ambiente.
 - Tiene que ver con las propiedades intrínsecas del material: índice de fusión, distribución del peso molecular, cristalinidad, orientación y endurecimiento de las partículas (laminación).
 - Las fallas son atribuidas a los esfuerzos residuales en las operaciones de moldeo o extrusión.
 - Estos esfuerzos pueden liberarse por sí mismos bajo la influencia de un ambiente adverso y esfuerzos poliaxiales.



8.4. Environmental Stress Cracking - ESC (2)

- Para establecer la resistencia al ESC se ha desarrollado el test de carga constante elástica con muesca de un solo punto SP-NCTL (ASTM D 5397).
 - Este test también puede ser utilizado para controlar las soldaduras.
 - Se recomienda que la resistencia al stress cracking ESCR/NCTL sea superior a 300 h para que no haya craqueo ambiental.
 - El ESC es tremendamente sensible a la temperatura ambiental, cada 7°C la tasa de crecimiento de grietas se duplica.
 - También se ve muy afectado por la agresividad de gases y lixiviados.



9. Comparativa de barreras minerales

		Bentonita + Polímero	Geocompuesto Bentonita GCL	Suelo Bentonita BES	Arcilla Compactada CCL
Espesor de la Barrera (cm)		7	1	25	100
Conductividad hidráulica (k) (m/s)	Inicial	3×10^{-11}	3×10^{-11}	1×10^{-10}	1×10^{-9}
	Post-Clausura	1×10^{-10}	1×10^{-8}	1×10^{-8}	1×10^{-7}
Gradiente Hidráulico (i) (Carga hidráulica: 0,3 m)		5,3	31,0	2,2	1,3
Flujo a través de la capa (mm/día)	Inicial	0,01	0,08	0,02	0,11
	Post-Clausura	0,05	26,78	1,90	11,23
Caudal Relativo	Inicial	1	6	1	8
	Post-Clausura	3	1955	139	820

10. Conclusiones

- Las capas de sellado están expuestas a severas condiciones ambientales, tensiones mecánicas, agresividad química de los lixiviados y de las aguas de infiltración, que van a comprometer la vida útil de los materiales.
- La respuesta dependerá de cada caso, en función de:
 - la naturaleza del material, fundamentalmente, de la degradación de:
 - su capacidad hidráulica (K) y
 - propiedades mecánicas
 - la calidad de la puesta en obra,
 - la agresividad química de lixiviados y aguas de infiltración
 - las características y condiciones del emplazamiento.
- Para incrementar la vida útil de las barreras minerales, se deberían proteger con un revestimiento artificial impermeable.
- Se recomienda llevar a cabo un control y seguimiento de la evolución de las propiedades mecánicas e hidráulicas de los materiales empleados, con el objeto de garantizar la estanqueidad del sistema, y en su caso, adoptar las medidas necesarias,
- Esta actividad se debería incluir en el plan de seguimiento ambiental durante el periodo de post-clausura.

Muchas Gracias
por su atención
Javier Moreno
(javier-ms@terratest.com)