

LA COBERTURA DE “EL CABRIL”: DISEÑO E INSTRUMENTACIÓN

M. Gran¹, J. Carrera², M.W. Saaltink¹, C. Ayora², C. Bajos³, P. Zuloaga³, A. Armada³, M. Rey⁴

¹ Dep. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Jordi Girona 1-3, Edificio D2, Barcelona, España. meritxell.gran@upc.edu

² Instituto Jaume Almera de Ciencias de la Tierra, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Lluís Solé i Sabarís s/n, Barcelona, España.

³ Empresa Nacional de Residuos Radioactivos S.A. (ENRESA), Emilio Vargas 7, Madrid, España.

⁴ Asociación para la Investigación y el Desarrollo Industrial de los Recursos Naturales (AITEMIN), Alenza 1, Madrid, España.

RESUMEN. Es habitual construir coberturas para aislar residuos urbanos y desechos industriales. Aquí se describe el diseño e instrumentación de una cobertura para residuos de baja y media actividad, lo que condiciona sus características de seguridad y durabilidad. Teniendo en cuenta todo ello, se han diseñado dos coberturas piloto a escala real, en parte basadas en el concepto de barrera capilar, e instrumentadas para la toma de medidas de temperatura, presión, grado de saturación del suelo y caudales de escorrentía superficial e infiltración.

ABSTRACT. Low permeability covers are usual within the limits of landfills and industrial waste storage and management. Here, we focus on the design and monitoring of one such cover for isolating low and medium radioactive waste, which constrains its reliability and durability.. Bearing this in mind, two pilot covers have been designed on a real scale, partly based on the capillary barrier effect. They will be equipped with instruments to measure temperature, pressure, degree of saturation, water infiltration and runoff.

1.- Introducción

El Cabril es el centro de almacenamiento de residuos de baja y media actividad (RBMA), administrado por ENRESA, y situado al noroeste de la provincia de Córdoba, en las estribaciones de Sierra Albarrana, dentro del término municipal de Hornachuelos.

Los residuos allí almacenados, están protegidos por un completo sistema de barreras que en el momento de su cierre se prevé completar con una última barrera, la cobertura. Ésta, deberá garantizar el aislamiento de los residuos durante un periodo mínimo de 300 años, tiempo necesario para que los valores de radiación emitidos sean inocuos para la salud pública.

El ensayo que centra este documento, consiste en la realización de dos coberturas piloto, en la misma localización que el centro de almacenaje, pero sin cubrir ningún tipo de residuos.

El diseño de una cobertura para residuos radioactivos requiere la consideración de diversos factores. Deberá

contribuir a la reducción de la erosión, la eliminación de aguas superficiales, la protección frente a la biointrusión, la minimización de la permeabilidad para limitación de aguas infiltradas y el drenaje de las infiltraciones. Es decir, debe garantizar que no se produzca ningún tipo de entrada de agua, líquida o vapor, ni de agentes externos físicos o biológicos, que puedan afectar al aislamiento de los residuos.

En el presente estudio, se trata el diseño e instrumentación de una cobertura cuyo funcionamiento hidráulico se basa, en parte, en el concepto de barrera capilar.

Tradicionalmente, las barreras capilares han sido estudiadas para coberturas de vertederos y depósitos de materiales peligrosos, para desviar los flujos de agua y mantener aislados los materiales (Stormont y Morris, 1998); también se han estudiado para investigar los efectos de la heterogeneidad y la anisotropía (Stormont, 1995; Ho y Webb, 1998) y para ver la influencia de la geometría en su efectividad.

Una barrera capilar consiste en una capa de material de grano fino cubriendo una capa de material más grueso, que bajo las condiciones apropiadas, desviará el agua infiltrada y evitará su paso a la capa de material grueso (Ross, 1990). Bajo condiciones de succión, el contenido de agua en la capa de material fino es mucho mayor que en la capa inferior, de material más grueso. Dado que la permeabilidad relativa se reduce significativamente al bajar el contenido de agua, el contraste textural dificulta el flujo de agua en sentido descendente y tiende a mantener seca la capa inferior (Pease y Stormont, 1996).

Si además, estas capas están inclinadas, el agua se desviará lateralmente por la parte baja del material más retentivo. A mayor pendiente, mayor transporte lateral del fluido a lo largo de la interfaz entre los dos materiales, menor el grado de saturación del material fino, mayor la efectividad de la barrera capilar y por lo tanto, menor la infiltración (Ho y Webb, 1998). La capacidad de desviación del flujo de agua es función lineal de la pendiente del sistema (Kämpf et al. 2003). Si la disposición de las capas es horizontal, el agua se acumulará en la capa de material más fino, constituyendo así una reserva de agua disponible para ser evaporada o transpirada a través de las raíces de las plantas.

Otro factor que influye sobre la efectividad de la barrera

capilar es el contraste del tamaño de las partículas entre las dos capas (Smesrud y Selker, 2001), es decir, el consecuente contraste de conductividades hidráulicas entre los dos materiales (Kämpf et al. 2003). Se ha demostrado que en el 80% de los casos estudiados, se obtiene una desviación máxima para una relación de 2.5 entre material grueso y fino, mientras que se obtiene el máximo en un 90% de los casos para una relación de 5 veces mayor el tamaño de las partículas del material grueso frente a las del material fino. Es decir, que no es necesario llegar a contrastes muy elevados para que exista una desviación del 80% del flujo de agua infiltrado. Es más, un mayor contraste incluso podría producir el efecto contrario, ya que la mayor diferencia de tamaño entre las partículas facilitaría el paso de las partículas finas de la capa superior hacia la capa inferior, conectándolas, rompiendo el efecto de barrera capilar y permitiendo el flujo de agua descendente (Smesrud y Selker, 2001; Tidwell et al. 2003). El agua acumulada en la base del material fino irá aumentando el contenido de agua del suelo y propiciando el colapso del sistema y el paso del agua a la capa inferior, permitiendo así la recarga (Khire et al. 2000). Todo esto es clave en la elección de los materiales a utilizar en el ensayo actual.

En lo referente a la reducción de la erosión, la mezcla de grava con el suelo aumenta la resistencia a la erosión de la superficie, pero se debe tener en cuenta que puede llegar a disminuir la evapotranspiración (Albright, 2002). Mezclas de un 22% y un 33% de grava con el suelo, resultan ser igualmente efectivas reduciendo la erosión sin afectar al crecimiento de la vegetación y disminuyendo de igual modo la evaporación, siempre y cuando, el diámetro de esta grava no supere los 1.3 cm (Waugh et al. 1994).

Estudios realizados combinando una capa de gravilla (diámetro 0.5-1.5 cm) con una inferior de cantos rodados (10-20 cm), demuestran la efectividad de esta disposición para evitar la intrusión de animales y de raíces (Anderson y Forman, 2002; Albright, 2002). Se ha mostrado también que una capa de 30 cm de espesor de cantos rodados dispuesta entre dos capas de 10 cm de espesor de arena, son efectivas para evitar el paso incluso de cierto tipo de hormigas excavadoras (Gaglio et al. 2001).

Con el objetivo de cumplir todas estas funciones, históricamente se han realizado numerosos ensayos combinando distintos tipos de materiales, espesores, disposiciones, pendientes,... buscando así el diseño de una cobertura viable y efectiva.

Scanlon et al. (2005), realizaron ensayos de tres tipos distintos de cobertura en clima árido y semiárido, dos de ellos basados en el mecanismo de la evapotranspiración (ET) y un tercero en el de barrera capilar (CB). Se observó que la vegetación controla el balance de agua en las coberturas ET, haciéndolas menos robustas, y se destaca el funcionamiento de la CB como más satisfactorio. En la misma línea, Waugh et al. (2004), realizaron ensayos en lisímetros para poder observar las diferencias entre utilizar distintos tipos de suelos y grados de compactación, concluyendo que existen importantes diferencias de funcionamiento, sobretudo en años húmedos. Los materiales más compactados y menos granulares presentan

una menor capacidad de retención, lo que dificulta el crecimiento de la vegetación y reduce la evapotranspiración, aumentando así la infiltración.

Por otro lado, Dwyer, (2003), realizó ensayos con seis coberturas a gran escala. Tres de ellas de tipo resistivo, es decir, con conductividades hidráulicas saturadas muy bajas para impedir el flujo de agua, dos de ellas CB y una última tipo ET. La que mostró mejores resultados fue la ET, dando caudales de infiltración muy bajos, mientras que se observó que las de tipo resistivo tenían una menor capacidad de almacenamiento de agua, menos evapotranspiración y mayor infiltración y que eran fácilmente alterables por la erosión, las heladas y la biointrusión. Las de tipo CB sufrieron un exceso de compactación que las llevó a no permitir la fijación al suelo de las raíces de la vegetación y tampoco fueron efectivas contra la biointrusión.

De todos estos ensayos, se deduce que no existe aún un diseño óptimo que garantice el buen funcionamiento de una cobertura, que en estos casos tiene como objetivo preservar los residuos de un vertedero, que se pueda aplicar el caso de residuos radioactivos.

Así pues, se presenta una nueva propuesta de diseño de cobertura basada en el concepto de barrera capilar y con una disposición de capas de distintos materiales, que combinados resulten efectivos en todas las necesidades que la preservación de estos residuos conlleva. Principalmente, la desviación lateral del flujo infiltrado, junto a una elevada tasa de evapotranspiración, y la preservación de los materiales, evitando su alteración por biointrusión.

A todo esto se debe añadir algunas peculiaridades como la necesidad de una larga durabilidad, de centenares de años, o de la geometría de la cobertura propuesta, que consta de un talud del 40%, que condicionará fuertemente las condiciones de flujo dentro de la cobertura y dificultará las tareas de reducción de erosión e instauración de la vegetación. Anteriormente sólo se han estudiado coberturas con taludes de 5, 10, 15, 25 y de hasta un 33% (Albright, 2002).

Como en trabajos anteriores se han observado problemas para calcular la evapotranspiración (Dwyer, 2003), y por lo tanto, de obtener unos óptimos balances de flujo, se ha diseñado un completo sistema de monitorización y de recogida de aguas infiltradas que permitirá cuantificar los flujos de agua y de calor. La interpretación de estos flujos y las medidas del sistema de instrumentación, servirán también para validar los resultados obtenidos a través del modelo en 2D.

Con estos ensayos, se busca profundizar en el estudio de los procesos de flujo multifase, para mejorar la comprensión del comportamiento de los flujos de líquido, vapor de agua y calor, así como el estudio de los efectos que las distintas propiedades hidráulicas, presiones capilares y grados de saturación de los materiales que conforman las coberturas, pueden tener sobre la magnitud y sentido de estos flujos.

2.- Diseño

El ensayo está formado por dos coberturas denominadas ensayo I y ensayo II, de dimensiones similares (22m de largo por 10m de ancho) y separadas físicamente por una galería de hormigón. Se han realizado dos diseños distintos para poder comparar los resultados de las distintas combinaciones de materiales que se han aplicado en cada uno. Son coberturas multicapa, adyacentes y ambas constan de un sistema de barrera capilar, formado por una capa de arcilla superpuesta a una capa de arena. En el caso del ensayo I esta secuencia se repite, teniendo así dos barreras capilares en continuo.

Un esquema gráfico del diseño de las capas de las dos coberturas se puede ver en la figura 1 y figura 2.

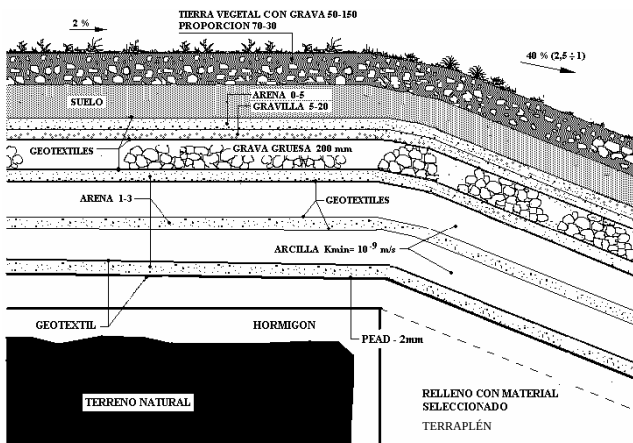


Fig. 1: Vista en sección de las capas que constituyen la cobertura de ensayo I.

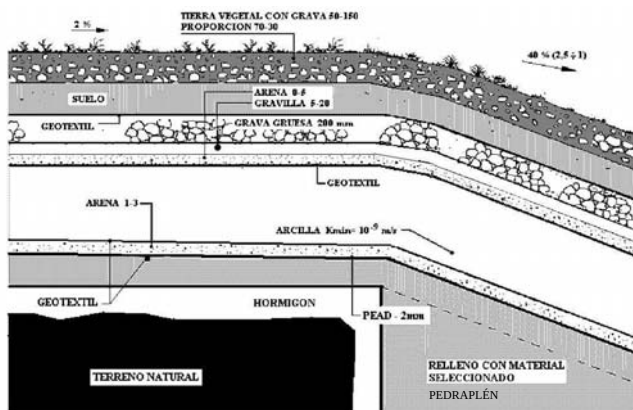


Fig. 2: Vista en sección de las capas que constituyen la cobertura de ensayo II.

En estas dos figuras anteriores se puede ver el número y orden de las capas que se ha determinado para cada uno de los diseños. El espesor total del conjunto de capas que forman las coberturas es de 3.15m para el ensayo I y de 2.95m para el ensayo II.

A continuación, se expone la función de cada una de estas

capas o combinación de éstas y también el espesor seleccionado en cada caso:

- Tierra vegetal con grava (0.4 m): reducir la erosión eólica y por escorrentía y facilitar la instauración y crecimiento de vegetación para promover la evapotranspiración.
- Suelo (0.4 m): retención de suficiente cantidad de agua como para permitir la instauración y crecimiento de vegetación, para promover la evapotranspiración y favorecer el crecimiento de plantas de raíz corta.
- Capas de arena y gravilla (0.15 m cada una): conjuntamente realizan la función de filtro, evitando la contaminación entre materiales ya que evitan que los materiales finos se mezclen con los materiales de la capa inferior. Para ello se disponen de forma granocreciente, en sentido descendente. Estas capas constituyen una primera barrera capilar. A su vez, la capa inferior del filtro (gravilla 5-20 mm) realiza, junto con la capa de cantos rodados, la función de barrera contra la biointrusión.
- Cantos rodados (0.4 m): junto con la capa de gravilla del filtro, realiza la función de barrera contra la biointrusión. No siendo un material retentivo evita almacenar agua, no atrayendo así a las raíces. Por su combinación de distintos tamaños de grano (demasiado grandes para ser cargados por ciertas especies de pequeño tamaño y a la vez con poca estabilidad, para desmoronarse encima de especies de mayor tamaño que pudieran excavar en el material) evita el paso de animales, desde hormigas a pequeños mamíferos, que pueden crear vías preferentes para el paso del agua y además disminuir la cohesión de los materiales de la cobertura.

- Arcilla (0.45 m, cada una, en el ensayo I y 1 m en el ensayo II): junto con la capa inmediatamente inferior (arena fina) forman una barrera capilar. Así, su mayor capacidad de retención de agua y su mayor permeabilidad favorecen la circulación del agua en dirección horizontal, cerca de la base de la capa de la arcilla, y evitan su paso hacia los materiales inferiores.

- Arena (0.15 m): junto con la capa superior de arcilla forma la barrera capilar. Su función es, gracias a su baja capacidad de retención y a su baja permeabilidad, cortar el paso del agua en sentido descendente desde la arcilla superior y en caso de producirse éste, actuar como drenaje lateral para desaguar el agua infiltrada. La función de la capa de arena que no está junto a la arcilla, es la de actuar de drenaje.

En la base de ambas coberturas se ha incluido una lámina de geomembrana de PEAD impermeabilizante de 2 mm. También se han incluido varias láminas de geotextil antipunzonamiento de 200 gr/m² que tienen como objetivo, en un caso, proteger la lámina de PEAD y, en el resto, colaborar en la separación y colocación de los distintas capas de material.

3.- Instrumentación

Con el objetivo de observar y comprender el comportamiento de los flujos de agua, en fase líquida y en fase vapor, y de flujo de calor dentro de las coberturas, se

ha diseñado un completo sistema de instrumentación. Se monitorizarán medidas de contenido volumétrico de agua, temperatura, humedad, succión, escorrentía superficial y caudales de infiltración.

Cada cobertura se ha dividido en cuatro secciones, ya que se esperan condiciones de flujo distintas entre ellas. En la figura 3 se puede ver un esquema de dichas secciones.

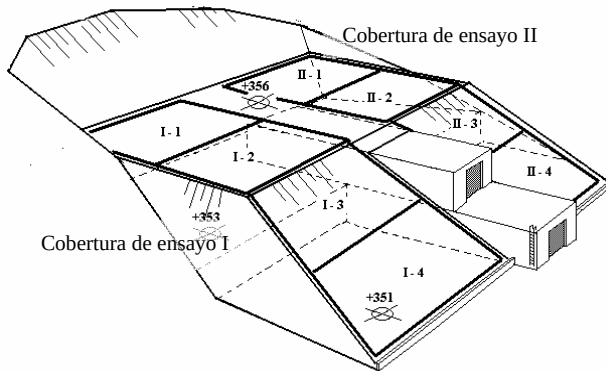


Fig. 3: Vista general del sistema de las dos coberturas y su división en secciones para las zonas de instrumentación.

La condición de contorno en el límite superior de la sección 1 es de flujo nulo, en esta sección tendremos un caudal bajo (sólo el que entre por infiltración desde su superficie), mientras que en la sección 2 tendremos un caudal medio, ya que al caudal que llega desde la sección 1 se le sumará el infiltrado en la propia sección 2. Además, estas dos secciones tienen una pendiente baja.

En la sección 3, también tendremos un caudal medio, pero con una pendiente alta, y en la sección 4, un caudal elevado junto con una pendiente alta. Estas diferencias de caudal y de pendiente generarán líneas de flujo homogéneamente distribuidas en la vertical de las secciones 1 y 2, mientras que en las secciones 3 y 4, se concentrarán en la zona inferior, hacia su base, dando así unas distribuciones de flujo distintas en cada sección.

Estas diferencias en las condiciones de flujo y las distintas propiedades de los materiales, generan presiones y grados de saturación muy distintos en cada zona. Si a esto le añadimos las limitaciones de medida, de rangos y operatividad, que tiene cada una de las sondas de medición, (tanto de presiones, como de contenido de agua) es obvio que se necesita instrumentación distinta según la zona. Para abarcar todos estos rangos de medida, se ha diseñado el sistema de instrumentación que se puede ver en la figura 4, para el ensayo I, y en la figura 5 para el ensayo II.

Las sondas precedidas de un triángulo son de medidas térmicas, las de cuadrado son de contenido de agua y las de círculo, de presiones.

Respecto a las medidas térmicas, la *T* significa termopar (medida de temperatura), *SH* es la sonda que mide las propiedades térmicas del suelo (proporciona datos de conductividad, difusividad y capacidad calorífica del suelo, correlacionables con el contenido volumétrico de agua) y *placa* es la placa que mide el flujo de calor en el suelo.

Las medidas de contenido de agua, se realizarán mediante TDR.

Para medir la succión disponemos de tensiómetros, para succiones muy bajas, psicrómetros y sensores de presión matricial (*p. matricial*) para succiones medias, y los higrómetros para las succiones más altas.

t. vegetal	▲-T ▲-SH-PLACA ▲-T ▲-SH-PLACA ▲-T	□-TDR	○-HIGROMETRO ○-P.MATRIC. ○-HIGROMETRO ○-P.MATRIC.
suelo	○-TENSIOMETRO	□-TDR	○-HIGROMETRO ○-PSICROMETRO ○-HIGROMETRO ○-PSICROMETRO
arena	▲-T	□-TDR	
gravilla	▲-T		
cantos			○-HIGROMETRO
arena		□-TDR	○-PSICROMETRO ○-P.MATRIC.
arcilla	○-TENSIOMETRO	□-TDR	○-PSICROMETRO ○-PSICROMETRO
arena		□-TDR	○-HIGROMETRO ○-PSICROMETRO
arcilla	○-TENSIOMETRO	□-TDR	○-PSICROMETRO ○-PSICROMETRO
arena		□-TDR	○-HIGROMETRO ○-PSICROMETRO

Fig. 4: Sección en vertical del sistema de instrumentación de la cobertura de ensayo I.

t. vegetal	▲-T ▲-SH-PLACA ▲-T ▲-SH-PLACA ▲-T	□-TDR	○-HIGROMETRO ○-P.MATRIC. ○-HIGROMETRO ○-P.MATRIC.
suelo	○-TENSIOMETRO	□-TDR	○-HIGROMETRO ○-PSICROMETRO ○-HIGROMETRO ○-PSICROMETRO
cantos			○-HIGROMETRO
arena	▲-T		
gravilla	▲-T	□-TDR	○-P.MATRIC.
arena	○-TENSIOMETRO	□-TDR	○-PSICROMETRO
arcilla		□-TDR	○-PSICROMETRO
arena		□-TDR	○-HIGROMETRO ○-PSICROMETRO

Fig. 5: Sección vertical del sistema de instrumentación de la cobertura de ensayo II.

Las secciones de instrumentación de las figuras 4 y 5, están situadas en el centro geométrico de cada una de las secciones de las dos coberturas (Fig. 3), es decir, se repiten cuatro veces en la cobertura de ensayo I y cuatro más en la de ensayo II, resultando así, un total de ocho sistemas de instrumentación. Se debe matizar, que el sistema de las figuras 4 y 5 se reproduce exactamente en tres de las cuatro secciones de cada cobertura (en las secciones I-1, I-2, I-3, II-1, II-2 y II-3), y que en las secciones cuartas (I-4 y II-4) se dispone de un sistema reducido de sensores (Fig. 6 y Fig. 7), formado solamente por sensores de medida de succión (en el caso de I-4: dos tensiómetros y una sonda de presión matricial y para la sección II-4: un tensiómetro y una sonda de presión matricial).

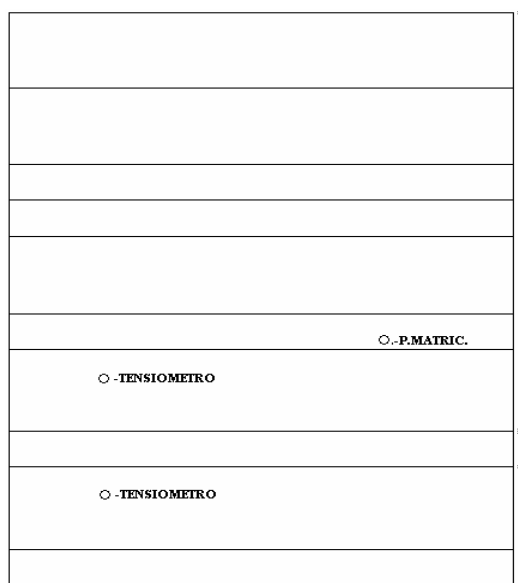


Fig. 6: Sección en vertical del sistema de instrumentación de la sección I-4.

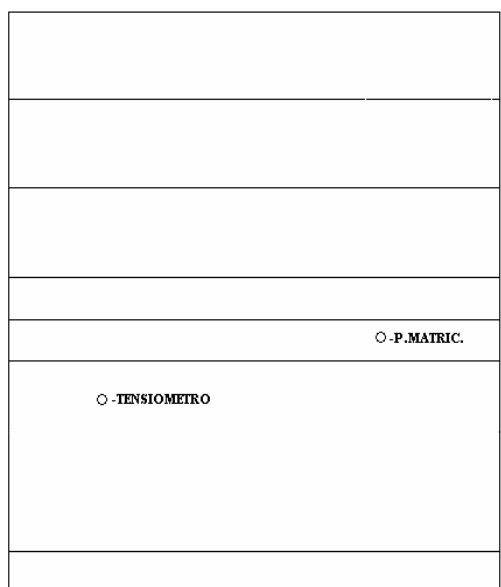


Fig. 7: Sección en vertical del sistema de instrumentación de la sección II-4

Los datos de velocidad y dirección del viento, radiación de onda corta entrante, temperatura y humedad relativa se obtienen mediante una estación meteorológica. La instalación, en ambos ensayos, de instrumentación de parámetros geotécnicos, permite la medición de asentos en superficie y en profundidad y de las tensiones en la lámina de PEAD situada bajo la cobertura multicapa. Los hitos topográficos proporcionan la medida de los asentos en superficie.

Todos los sensores que se han mencionado tienen su correspondiente cableado dispuesto en horizontal, paralelo a la base y el techo de cada una de las capas, evitando así la conexión entre ellas. El cableado tiene su origen en el propio sensor, en el centro de cada una de las secciones de instrumentación, y su final en la galería de hormigón que separa las dos coberturas (ver Fig.3). Se considera que la colocación de la instrumentación desde esta galería de hormigón facilita la preservación del material de procesamiento y almacenamiento de datos, mediante los *datalogger* instalados, facilitando a la vez el acceso a él.

Para la recogida de las aguas infiltradas y de escorrentía superficial se ha previsto el drenaje de las capas de cobertura de ensayo. Seis líneas de drenaje en la cobertura de ensayo I y cinco en la cobertura de ensayo II, recogen el agua infiltrada mediante zanjías situadas al final de las secciones I-4 y II-4. Estas zanjías (ver Fig.8) se sitúan a lo largo de todo el frente de las coberturas, están rellenas de arena y gracias a su 2% de inclinación, llevan el agua hasta la galería de hormigón que separa las coberturas. De este modo, es posible cuantificar los caudales y también la toma de muestras de esta agua.

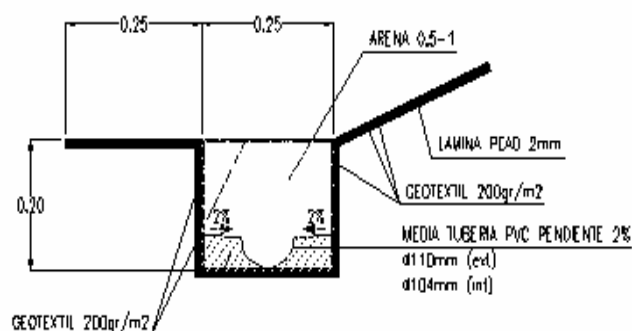


Fig. 8: Detalle de la sección de la zanja de drenaje de agua infiltrada.

En la figura 9 se puede ver, en sección, la distribución de estas líneas de drenaje para el caso de la cobertura de ensayo II. De abajo a arriba: la línea de drenaje 1 recoge el agua infiltrada de la última capa de arena, bajo la arcilla. La línea 2 recoge el agua de la capa de arcilla, mientras que la línea 3 recoge las aguas de las capas de filtro y cantos y la línea 4 la de las capas de suelo y tierra vegetal. Por último, la línea de drenaje 5 recoge las aguas superficiales. En la figura 9, se puede apreciar debajo de la parte frontal de la cobertura, bajo tierra, al final de cada una de las líneas de drenaje, las secciones de las zanjías de drenaje de las

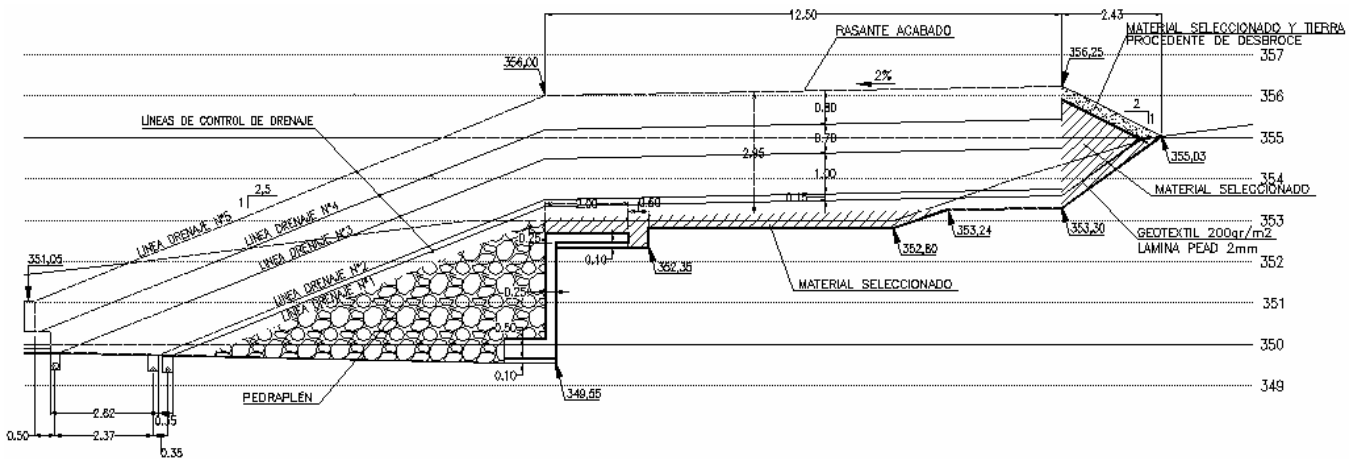


Fig. 9: Detalle de la sección de la cobertura de ensayo II, donde se pueden observar las líneas de drenaje

líneas 1, 2 y 3. Las líneas 4 y 5, capas superiores, terminan en un muro de hormigón en superficie, donde se canalizan con el mismo sistema de zanjas. De este modo, es posible diferenciar por zonas el agua infiltrada, dato muy útil para los ensayos de trazadores. Estos ensayos consisten en la distribución de distintos cócteles de trazador en las capas de tierra vegetal, suelo y arcilla, aplicados en solución durante la puesta en obra de los materiales. Mediante la interpretación de las curvas de llegada del trazador en el sistema de drenaje, se pretende determinar su distribución espacial y el modo de avance del flujo a través del suelo (homogéneo o por vías preferenciales).

4.- Estado actual

Como ya se ha comentado anteriormente, el ensayo que centra este documento no está finalizado. Actualmente, Mayo 2007, se ha iniciado el proceso constructivo en las instalaciones de El Cabil. Su duración aproximada es de cuatro meses.

Una vez finalizada la construcción, se iniciará el proceso de interpretación a partir de los registros obtenidos de los distintos sensores. Simultáneamente, se está realizando el modelo en 2D utilizando el código RETRASO-CODEBRIGHT, que permite acoplar transporte reactivo y flujo multifase, y que constituye una herramienta más para intentar comprobar la efectividad de los sistemas, de cara a definir el diseño para la cobertura definitiva.

Agradecimientos. Este trabajo ha sido financiado por ENRESA, en el marco del proyecto "Simulaciones de flujo multifase para el diseño de capas de cobertura y para estudios de evolución de celdas".

Bibliografía

Anderson, J. E. y A. D. Forman (2002). The Protective Cap/Biobarrier Experiment: A Study of Alternative Evapotranspiration Caps for the Idaho National Engineering and Environmental Laboratory. S. M.

- Stoller Corporation, Idaho Falls, Idaho, STOLLER-ESER-46.
- Dwyer, S.F. (2003). Water balance measurements and computer simulations of landfill covers. *Dissertation, University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico.*
- Gaglio, M.D., Mackay, W.P., Padilla, D., Webb, R. y LeMone, D.V. (2001). The effectiveness of biobarrier layers within protective caps at preventing penetration of waste sites by the harvester ant *pogonomyrmex salinus olsen*. *WM'01 Conference, February 25-March 1, 2001, Tucson, AZ.*
- Ho, C.K. y Webb, S.W. (1998). Capillary barrier performance in heterogeneous porous media. *Water Resour. Res.*, Vol. 34 (4), 603–609.
- Kämpf, M., Holfelder, T. Y Montenegro, H. (2003). Identification and parameterization of flow processes in artificial capillary barriers. *Water Resour. Res.*, Vol. 39, Issue 10..
- Khire, M. V., Benson, C. H. y Bosscher, P. J. (2000). Capillary barriers: Design variables and water balance. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 126(8), 695–708.
- Pease R.E. y Stormon, J.C. (1996). Increasing the diversion length of capillary barriers. *Proceedings of the HSRC/WERC Joint Conference on the Environment, Great Plains/Rocky Mountain Hazardous Substance Research Center.*
- Ross, B. (1990). The diversion capacity of capillary barriers. *Water Resour. Res.*, Vol. 26(10), 2625–2629.
- Scanlon, B.R., Reedy, R.C., Keese, K.E., y Dwyer, S.F. (2005). Evaluation of evapotranspirative covers for waste containment in arid and semiarid regions in the southwestern USA. *Vadose Zone Journal* 4(1):55-71.
- Smesrud, J. K. y Selker, J. S. (2001). Effect of soil-particle size contrast on capillary barrier performance. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 127(10), 885–888.
- Stormont, J. C. (1995). The effect of constant anisotropy on capillary barrier performance. *Water Resour. Res.*, Vol. 31(3), 783-78, March 1995.
- Stormont, J. C. y Morris, C. E. (1998). Method to estimate water storage capacity of capillary barriers. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 124(4), 297–302.
- Tidwell, V. C., Glass, R. J., Chocas, C., Barker, G. y Orear, L. (2003). Visualization experiment to investigate capillary barrier performance in the context of Yucca Mountain emplacement drift. *Journal of Contaminant Hydrology* 62-63 (2003) 287-301.
- Waugh, W.J., Thiede, M.E., Bates, D.J., Cadwell, L.L., Gee, G.W. y Kemp, C.J. (1994). Plant cover and water balance in gravel admixtures at an arid waste-burial site. *Journal of Environmental Quality*, 23 (4):676-685.
- Waugh, W.J., Smith, G.M., y Mushovic, P.S. (2004). Monitoring the performance of an alternative cover using caisson lysimeters. *WM'01 Conference, February 29-March 4, 2004, Tucson, AZ*