

# Análisis hidrogeológico de la escombrera exterior de la antigua mina de As Pontes

## *Hydrogeological analysis of the slag heap of old mine in As Pontes*

Juncosa, R.<sup>a1</sup>, Delgado, J.<sup>a2</sup>, Menéndez, J. A.<sup>b1</sup>, Valle, R.<sup>b2</sup> y García, D.<sup>a3</sup>

<sup>a</sup>Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de La Coruña, ETSI Caminos, Canales y Puertos, Campus de Elviña, 15192-La Coruña. (España). E-mail: <sup>a1</sup> rjuncosa@udc.es, <sup>a2</sup> jdelgado@udc.es, <sup>a3</sup> david.morrondo@udc.es

<sup>b</sup>ENDESA GENERACIÓN, Centro minero de As Pontes, 15320-As Pontes, La Coruña (España). E-mail: <sup>b1</sup> joseantonio.menendez@endesa.es, <sup>b2</sup> ramonjose.valle@endesa.es.

Recibido: 10/02/2015

Aceptado: 11/04/2015

Publicado: 28/04/2015

---

## RESUMEN

Con el fin de analizar la influencia de las aguas subterráneas de la escombrera exterior de la antigua mina de lignito de As Pontes (Galicia) sobre el lago minero adyacente se ha procedido a hacer una caracterización hidrogeológica de la misma. Para ello, ha sido necesario hacer diferentes ensayos hidráulicos en distintos puntos representativos de la escombrera para estimar los parámetros hidrodinámicos e identificación de las distintas unidades hidrogeológicas, las cuales se pueden describir como independientes. En el presente trabajo se concluye que la cobertera externa de la escombrera presenta valores de permeabilidad característicos de un limo arcilloso distribuidos espacialmente de manera homogénea, por lo que se minimiza la posible infiltración y su posible percolación a posiciones más profundas, y su posterior descarga al lago por los taludes contiguos. La influencia de la descarga subterránea es nula.

**Palabras clave** | ensayos de bombeo; ensayos Gilg Gavard; permeabilidad, recarga; descarga subterránea; flujo de Darcy.

---

## ABSTRACT

*In order to analyze the influence of groundwater from the slag heap of the lignite mine of As Pontes (Galicia) on the mining adjacent lake it has proceeded to make a hydrogeological characterization of the slag heap. For this, it was necessary to make different hydraulic tests at different points representing the dump to estimate the hydrodynamic parameters and identification of the different hydrogeological units, which can be described as independent. In this study, we conclude that external covert of dump has homogeneously distributed values of permeability of clayey silt. Therefore, the possible infiltration and possible percolation to deeper positions and later discharge to lake by adjacent slopes is minimized. So, the influence of groundwater discharge is null.*

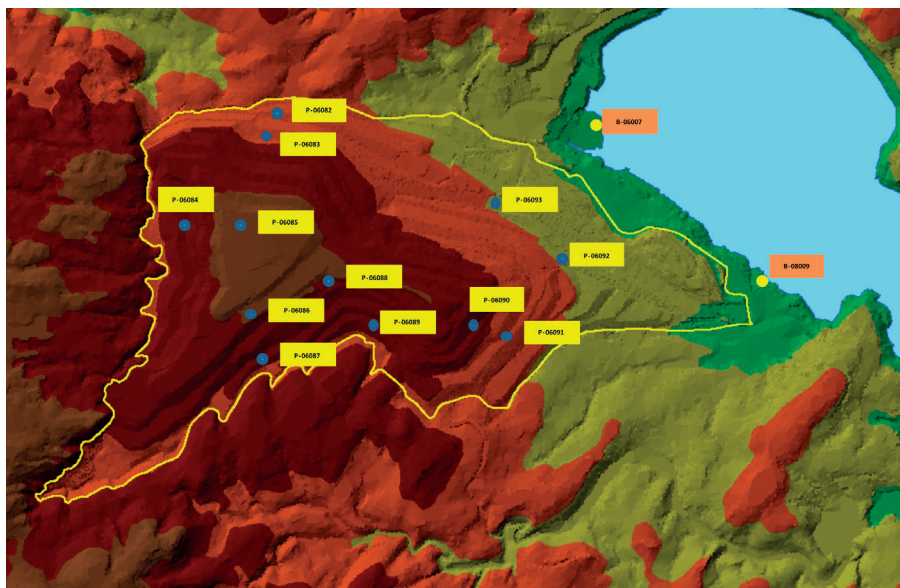
**Key words** | pumping tests; Gilg Gavard tests; permeability; recharge; groundwater discharge; Darcy flow.

## INTRODUCCIÓN

La Mina de As Pontes y su escombrera exterior se encuentran al Noroeste de la provincia de La Coruña a una altitud de unos 400 m.s.n.m., el hueco minero se encuentra bordeado por distintos ríos y arroyos tributarios del río Eume, río cuyo cauce se sitúa al Este de la explotación. La escombrera exterior se ha desarrollado en forma piramidal donde la altimetría se encuentra comprendida entre 375 m y 540 m, con una potencia de estéril que puede alcanzar hasta 160 m. Las precipitaciones medias anuales (módulo pluviométrico anual medio) se encuentran entre 1700 y 2000 mm, oscilando la temperatura media mensual entre 5°C en invierno y 19°C como temperatura media mensual de los meses más cálidos.

La finalidad de este trabajo es conocer la influencia de las aguas subterráneas procedentes de la escombrera exterior de la antigua mina de lignito sobre la calidad de las aguas del lago minero. La escombrera exterior, cuyas dimensiones alcanzan 1150 ha de superficie, es una potencial zona de recogidas de agua, la cual va a poder infiltrarse en la misma alcanzando el zócalo geológico, disolviendo sustancias modificando su calidad química, y de ahí, descargar al hueco minero.

En consecuencia, es necesario identificar las posibles unidades hidrogeológicas de la escombrera a partir del análisis del material almacenado a lo largo de todo el período que estuvo la actividad minera en funcionamiento hasta la restauración y rehabilitación del espacio. El conocimiento del comportamiento hidrodinámico no sólo de la escombrera sino también del zócalo geológico sobre el que se asienta dicha escombrera es fundamental para poder determinar la influencia cuantitativa de las aguas infiltradas sobre la calidad de las aguas del lago minero. En la Figura 1 se muestra un plano topográfico de la situación de la escombrera exterior y la posición del lago minero.



**Figura 1** | Plano de situación de la escombrera y el lago minero de As Pontes. En amarillo: piezómetros abiertos. En ocre: Pozos entre escombrera y lago.

## DESCRIPCIÓN DE LA ESCOMBRERA

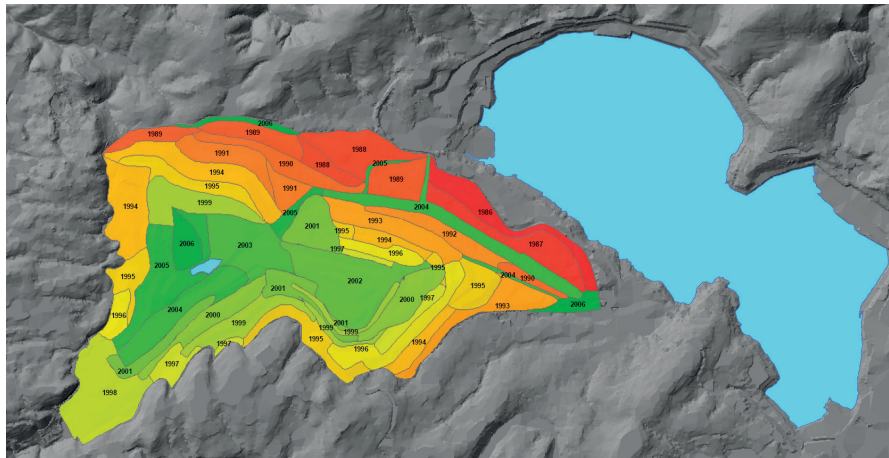
### Desarrollo de la Escombrera

El origen de la escombrera exterior de la mina de As Pontes de García Rodríguez se remonta a principios de los años 40 del pasado siglo, cuando la Empresa Nacional Calvo Sotelo se implantó en la región. Como consecuencia de la actividad extractiva, se empezó a apilar material estéril en la zona más antigua de la actual escombrera (conocida por ello como escombrera Calvo Sotelo). El material apilado en aquella época consistía en arcillas carbonosas procedentes de las zonas de contacto con el lignito, ricas en

materia carbonosa y de elevado contenido en sulfuros, motivo por el cual su alteración conduce a la generación de aguas ácidas en este sector de la escombrera.

A principios de los años 70, el cambio de titularidad de la concesión minera a ENDESA supuso importantes transformaciones en los métodos de explotación, acopiándose el material estéril en la escombrera hasta el año 2002. Como resultado de la explotación, el volumen de movimiento de tierras total en la escombrera alcanzó 720 hm<sup>3</sup>, con una altura máxima de 160 m y una ocupación de aproximadamente 1150 ha.

En 1980 se comenzaron a realizar las primeras labores de restauración sobre una capa superficial de 60 ha de escombrera generada hasta ese momento desde el inicio de la explotación (zona Calvo Sotelo). Posteriormente (año 1992), se elaboró el Plan de Restauración para las superficies afectadas por la explotación. La elaboración del Plan de Restauración se apoyó en estudios previos de las características agroclimáticas, edafológicas y botánicas del área circundante a la explotación, que sirvieron como base para evaluar el impacto ambiental de la explotación, seleccionar las especies vegetales a utilizar en la revegetación y para la asignación de usos de los nuevos terrenos. Además, sirvieron como apoyo a la elaboración del plan de restauración, los resultados obtenidos en diferentes ensayos, tanto en campo como en invernadero, para evaluar las enmiendas a utilizar en la corrección de la acidez de los estériles (caliza y ceniza derivada de la combustión de lignito), así como la experiencia obtenida en la primera etapa de la restauración. En la Figura 2 se muestra el esquema temporal del desarrollo de la escombrera exterior.



**Figura 2 |** Esquema temporal del desarrollo de la escombrera exterior de la mina de As Pontes de García Rodríguez y su localización en relación con el lago minero. Los números que acompañan las superficies de color representan los años de restauración.

## Morfología de la Escombrera

La morfología de la escombrera exterior estuvo condicionada por el proceso de apilado del material estéril procedente de la mina y la central térmica. La extensión de la misma también estuvo condicionada por el estéril generado y la zona de ubicación. Para el desescombro la zona elegida fue un valle suave (valle de Almigonde) con el fin de que sirviese de vaso de retención. A partir de la selección de la ubicación se procedió a apilar la zafra por tongadas siguiendo la dirección Este, Norte, Oeste y Sur. La zona última de desescombro fue la zona altimétricamente más alta, de esta forma la zona más antigua de la escombrera corresponde a la zona Este y Norte y las más recientes Sur, Oeste y Centro.

El Plan de restauración consistió en adecuar morfológicamente la escombrera exterior dotándola de taludes suaves con pendientes H:V de 5:1 a 3:1, en los cuales sea posible la reforestación y la siembra de vegetación, y desarrollando bermas amplias con pistas de acceso y caminos para poder recorrer y llegar a cualquier punto de la escombrera.

Sobre el apilado del material proveniente de la mina y de la central se implantó suelo vegetal con un espesor de unos 50 cm de media. Dicho material sirvió de base para la siembra y la forestación. En la base de cada talud existe un canal de recogida de aguas epidérmicas e hipodérmicas procedentes de cada berma superior constituyendo un sistema de drenaje que recoge importantes caudales que son reconducidos al hueco minero. Desde el punto de vista faunístico hay que hacer constar que la escombrera es una

reserva natural de distintas especies cinegéticas, contribuyendo ecológicamente a la preservación y cría de diferentes especies: aves, mamíferos...

Al finalizar la actividad extractiva minera también finalizó el proceso de desescombrado, terminando de rematar la implantación del suelo edáfico en la escombrera exterior. La restauración consistió, como ya se ha explicado, en otra fase con la siembra, reforestación, adecuación de bermas y taludes..., pero, desde un punto de vista geotécnico los procesos de asentamiento del material apilado continuaron, alcanzándose un equilibrio estable en las zonas más antiguas de la escombrera.

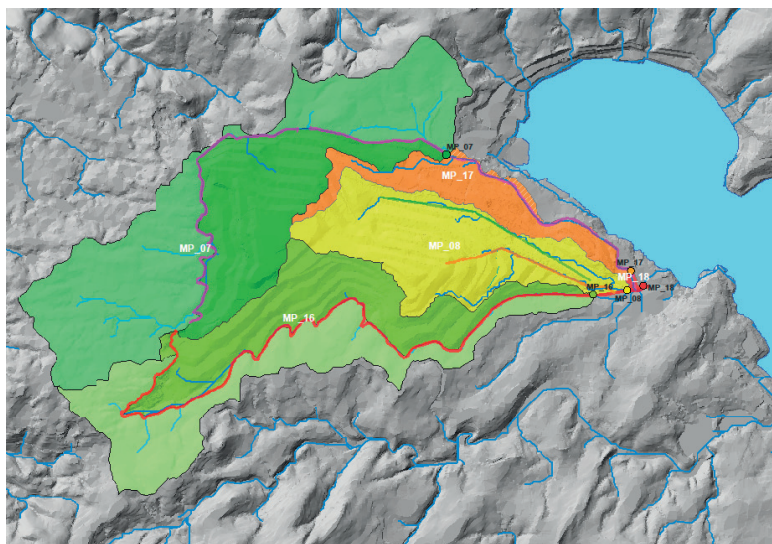
## Geología y materiales

La Escombrera exterior se halla sobre un zócalo geológico pelítico, constituido fundamentalmente por filitas, en cuyo muro se sitúan cuarzoesquistos, metaarcosas o bien cuarcitas. Dicha exposición geológica corresponde con el Ordovícico, en el cual se puede distinguir el Ordovícico inferior en el que, de muro a techo, se destacan cuarcitas feldespática, filitas y esquistos con impregnaciones ferrosas y niveles arenosos, y cuarcitas simples, y el Ordovícico medio y superior con una formación monótona de filitas negras.

El área ocupada por la escombrera Calvo Sotelo (escombrera más antigua) está constituida por estériles en los que predominan arcillas procedentes de las zonas de contacto con los niveles lignitíferos y son, por tanto, ricas en materia carbonosa, contenidos apreciables de minerales sulfurados y susceptibles de proporcionar, tras su meteorización, drenajes ácidos.

La escombrera más moderna fue construida siguiendo criterios de selección de estériles, con lo que se minimizó la generación de drenajes ácidos. Esta técnica ha demostrado ser muy eficaz desde el punto de vista de la protección frente a la contaminación de aguas superficiales.

Las características de los estériles que componen la escombrera exterior hubiesen impedido el crecimiento vegetal de no haber sido tratados adecuadamente, por ello el material apilado se realizó con mezclas de materiales preseleccionados (sedimentos terciarios, cenizas y pizarras). Factores como texturas inadecuadas, carencia de estructura en el sustrato, compactación, limitaciones nutritivas, acidez y toxicidad, hacen que los estériles procedentes de la minería de lignito sean los más difíciles de revegetar. Debido a esto, se optó por diseñar y crear nuevos suelos de mina adecuados a partir de estériles seleccionados mezclados con tierra vegetal, practicando enmiendas con calizas y cenizas de combustión, y procesos de fertilización tanto orgánica como química (Álvarez-Campana y Ramos, 2007). Estas tareas se fueron realizando a medida que la escombrera iba creciendo. En la Figura 3 se muestran las zonas restauradas de carácter heterogéneo formadas los sedimentos terciarios, el recubrimiento cuaternario del yacimiento, así como parte de las filitas del Ordovícico.



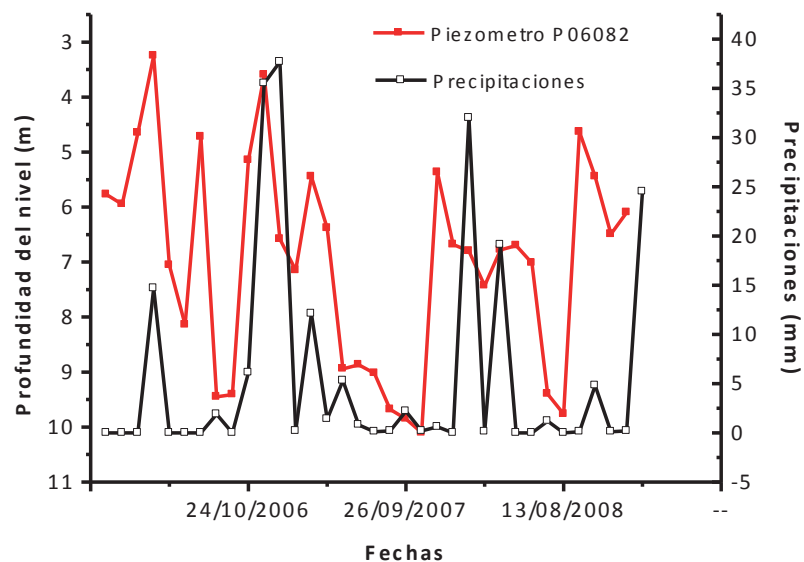
**Figura 3 |** Esquema de las distintas zonas de apilado y restauración. Zona más antigua: color naranja. Zona más moderna: color amarillo.

## EVOLUCIÓN DE LA ESCOMBRERA

Como ya se ha expuesto, al finalizar la actividad extractiva minera también finalizó el proceso de desescombrado, terminando de rematar la implantación del suelo edáfico en la escombrera exterior. Desde un punto de vista geotécnico los procesos de asentamiento del material apilado han continuado, alcanzándose un equilibrio estable en las zonas más antiguas de la escombrera.

El material en la zona más antigua (zona Este y Norte) se encuentra más asentado puesto que es la zona donde se terminó antes la deposición de material. En la zona Sur y Oeste, así como en el Centro (zona más alta), los asientos se han ido originando a medida que se continuaba depositando más material, de tal modo que a lo largo de los años en los que se terminó de depositar dicho material, el terreno ha continuado compactándose por el peso del mismo.

Para el análisis piezométrico de la escombrera se dispusieron 12 piezómetros abiertos distribuidos homogéneamente en toda la superficie de la escombrera en distintas bermas y zonas con profundidades de hasta 15 m, y 17 piezómetros de cable, con profundidades de hasta 140 m. Del análisis de la comparación de la evolución temporal, para un período concreto, de los niveles de los distintos piezómetros abiertos con la pluviometría se puede deducir que existe una correlación de la variación estacional de los niveles con la evolución temporal de la pluviosidad. En la Figura 4 se muestra, a modo de ejemplo, la evolución de los niveles piezométricos con respecto al emboquille del pozo y la precipitación en un piezómetro abierto dado.

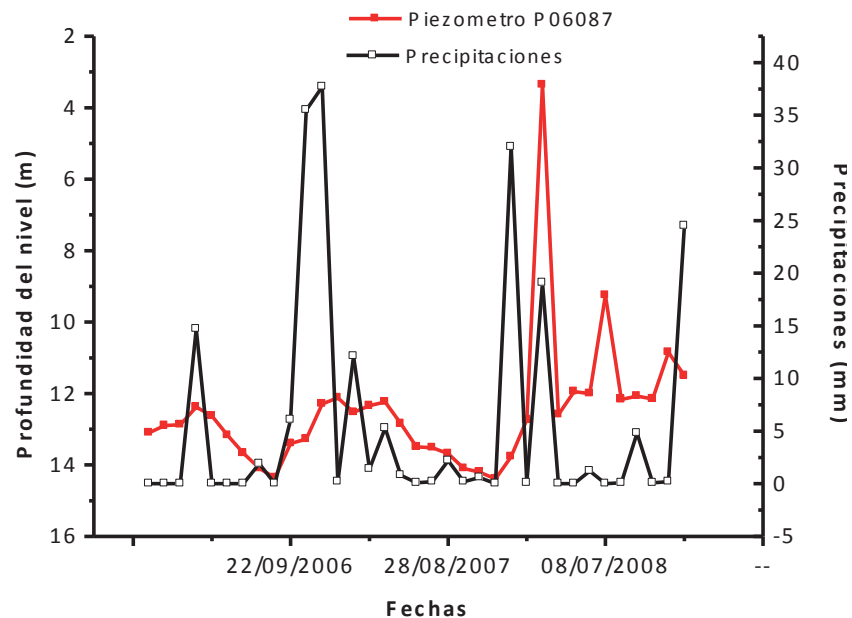


**Figura 4 |** Comparación de los niveles con respecto al emboquille y la precipitación: Ejemplo de piezómetro en la zona más antigua.

La variación no es instantánea ya que los valores que se representan corresponden a días concretos de un determinado mes. Para conocer el tiempo de respuesta o tiempo de transmisión de lo precipitado con los valores picos habría que disponer de valores diarios de niveles, lo cual no es posible.

Por otra parte, en rasgos generales, se puede observar una tendencia creciente de los niveles en los piezómetros más modernos (Figura 5), es decir los situados en la zona Sur y Centro de la escombrera exterior, lo cual es razonable pues el terreno está en proceso de asentamiento, lo que origina compactación del mismo y, en consecuencia, disminución de la cota del terreno, pero no del nivel del agua.

En los piezómetros abiertos situados en las zonas más antiguas, es decir en la zona Norte y Este, se puede apreciar una tendencia estable de los niveles pues el terreno se encuentra más asentado y la compactación residual es más tenue (Figura 4).



**Figura 5** | Comparación de los niveles con respecto al emboquille y la precipitación: Ejemplo de piezómetro en la zona más moderna.

Si bien los piezómetros abiertos, de menor profundidad, han servido para caracterizar hidrodinámicamente la superficie de la escombrera, los piezómetros cerrados han proporcionado información de las condiciones de saturación en que se encuentra el interior de la escombrera exterior.

En la Figura 6 se ha representado las presiones medidas con respecto a la profundidad para una fecha concreta (febrero-marzo 2009). Se puede apreciar que las presiones medidas no siguen la ley hidrostática lineal puesto que los valores de las presiones son inferiores a las que debería haber si el medio estuviese completamente saturado hasta la superficie (línea roja) o saturado hasta una cota determinada (cualquier línea recta paralela a la línea roja y por debajo de la misma), lo que indica que existe una zona no saturada de potencia variable. Incluso comparando valores de medidas en un mismo piezómetro a diferentes profundidades, los datos no siguen una norma fija, sino que el medio se presenta con respecto a las presiones medidas con tendencias distintas.

De la Figura 6 se puede observar que la mayoría de valores inferiores a 1 atm (aproximadamente, línea verde) se encuentran entre 30 y 60 m de profundidad con respecto a la cota superficial del terreno de la escombrera, lo que indica la existencia de una zona no saturada de potencia variable que, incluso puede llegar a 135 m. La capacidad de retención del terreno está relacionada con la granulometría, es decir con el tamaño de la partícula: cuanto más pequeño sea éste mayor superficie específica de la misma y, en consecuencia, mayor capacidad de adherencia (tensión superficial). El grado de compactación también influye de manera directa en el confinamiento del agua.

Hay que hacer constar que los piezómetros situados en la zona Norte y Este de la escombrera corresponden a los más antiguos. Todos estos piezómetros se encuentran con mediciones de presiones próximas a 1 atm, lo que indican que se encuentran en una zona no saturada cuya potencia puede rondar 50-60 m con respecto a la cota de la superficie del terreno.

Sin embargo, los piezómetros situados en bermas intermedias altas y en las zonas más modernas de la escombrera indican la existencia de agua confinada y no confinada a partir de 30-40 m de profundidad con respecto a la cota superficial y más alta de la escombrera (aproximadamente 536 m). Dichos piezómetros están situados en la zona Centro y Sur de dicha escombrera.

Existen distintos grados de confinamiento y que, en algunos tramos, la ley de presiones no es hidrostática, lo cual viene influenciado por el tipo de material apilado en cada franja o tongada horizontal.

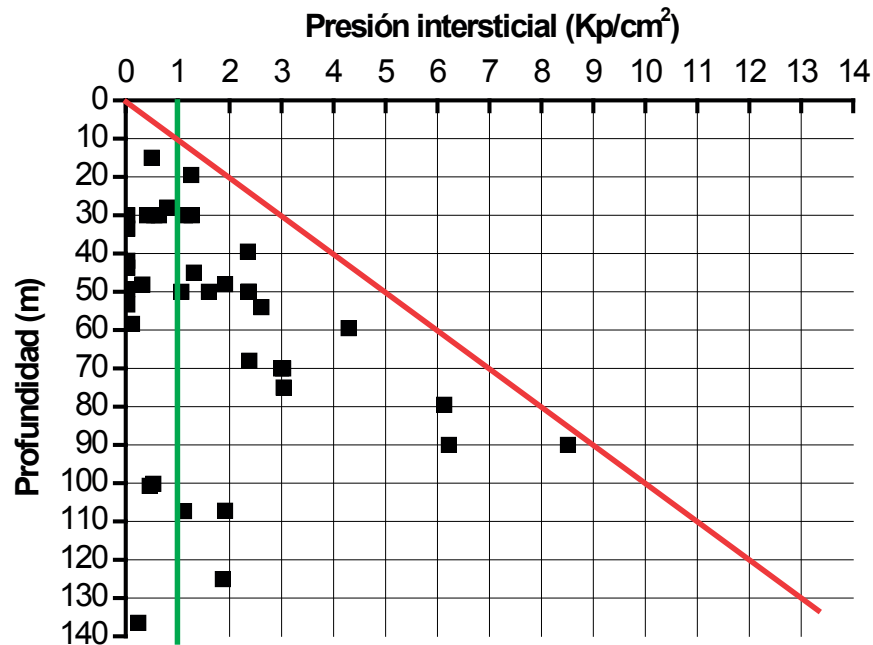


Figura 6 | Presiones medidas en los piezómetros cerrados con la profundidad en Febrero – Marzo de 2009.

Del mismo modo que ha sucedido en los piezómetros cerrados situados en la zona Norte y Este de la escombrera, es de esperar que los niveles de agua en los piezómetros situados en las cotas más altas y en la zona Centro y Sur vayan disminuyendo a lo largo de los años, por compactación y descarga en los recalces de los taludes, en forma de escorrentía hipodérmica, epidérmica subsuperficial y como recarga al zócalo subyacente. El nivel del agua se presenta, en dichas zonas a distinta cota absoluta con respecto al nivel del agua medido en los piezómetros situados en el Norte, lo que indica, por un lado, que, incluso, en la propia escombrera existen zonas de comportamiento hidrodinámico distinto (heterogeneidades), y, por otro, que en el proceso de apilado el material que se fue depositando llevaba ya un contenido de humedad importante, lo cual es lógico debido a la alta pluviometría de la zona, que ha ido menguando una vez terminado el apilado de material en la escombrera en 2002 y el compactado.

Por otra parte, la tendencia temporal general de todos los piezómetros es la de ir disminuyendo la medida de presiones, lo que indica que el agua almacenada en el proceso de apilado va percolando a zonas inferiores en cota, en este caso recargando el zócalo geológico. Dicha tendencia corrobora, a su vez, la baja capacidad de infiltración del terreno en las capas superiores ya que la presión medida en los piezómetros cerrados no detecta variaciones o fluctuaciones importantes con la pluviometría de la zona, hecho que sí sucede con los piezómetros abiertos, tal y como se ha explicado anteriormente. La tendencia temporal es muy suave. En el caso de los piezómetros situados en la zona Norte, sucede que el nivel al que están situados los sensores supera ya el nivel freático que ha ido disminuyendo, incluso alcanzando el zócalo geológico; por ello se puede identificar una potencia de la zona no saturada de unos 50-60 m.

Por todo ello, es razonable indicar que los procesos de asentamiento causan una mayor compactación del material, disminuyendo la porosidad y permeabilidad del mismo; hecho que se manifestará en un menor valor de la recarga al zócalo geológico. Esta compactación del material se manifiesta más claramente en las tendencias de aumento de los niveles de agua en los piezómetros abiertos situados en el Sur y Oeste de la escombrera, por ser terrenos más recientes. Asimismo, la compactación del material que conforma la escombrera aumentará con la profundidad, debido al peso cada vez mayor de la columna de terreno a medida que nos acercamos a la base de la misma.

## CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA ESCOMBRERA

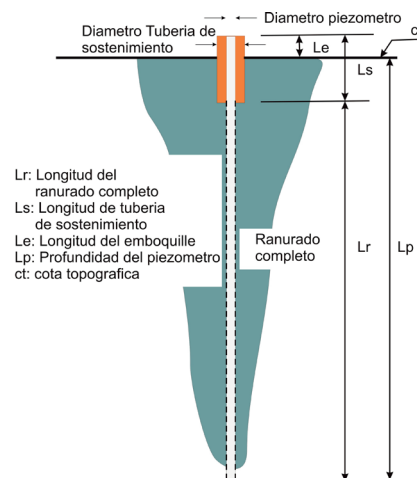
Como ya se ha podido analizar con los piezómetros de cable profundos y los abiertos someros existen discontinuidades hidrogeológicas en el propio material apilado en la escombrera presentando heterogeneidad en su comportamiento hidrodinámico profundo. Sin embargo, tal y como se desprende del análisis del zócalo geológico de la zona, el material que constituye éste está formado por filitas muy compactas de muy reducida permeabilidad. En consecuencia, para analizar la influencia de las aguas subterráneas que se encuentran almacenadas en la escombrera hay que identificar las zonas por las que descarga y estudiar la zona talud intermedia entre la escombrera y el lago minero. Por ello, se hace necesario el análisis hidrodinámico de la cobertera de la escombrera para identificar la trayectoria seguida por el agua precipitada.

Con el fin de conocer el funcionamiento hidráulico de la escombrera se realizaron una serie de ensayos de caracterización (Weight, 2009) utilizando piezómetros abiertos ya existentes repartidos espacialmente por la misma (Figura 1). Con ello se ha pretendido conocer espacialmente la distribución de permeabilidades de la cobertera superficial. Así mismo, también se analizó hidráulicamente el zócalo geológico mediante la interpretación de los resultados de los ensayos de bombeo ejecutados en el talud intermedio entre la escombrera y el lago.

### Caracterización hidrodinámica de la cobertera de la escombrera

En los 12 piezómetros abiertos se han realizado ensayos Gilg-Gavard de nivel variable pudiendo deducir el comportamiento hidrodinámico superficial de la escombrera, puesto que es la capa que condiciona la infiltración a zonas subyacentes. Dado que la profundidad del agua en los piezómetros se ha encontrado muy superficialmente (de 1.5 m a 12 m), los tramos ensayados se limitan a los primeros diez metros de terreno de la escombrera.

Los piezómetros abiertos tienen profundidades que alcanzan hasta 20 m, encontrándose entubados con tuberías ranuradas de PVC, tal y como muestra la Figura 7. Pueden ser considerados como pozos incompletos de pequeño diámetro (5 cm de diámetro).



**Figura 7 |** Esquema general de los piezómetros abiertos.

Los ensayos practicados no tienen en cuenta el espesor del acuífero ni si es cautivo o libre (hecho, por otro lado, irrelevante en este caso, puesto que se trata de material apilado y las condiciones que se dan son más bien de acuífero libre, recargado por la infiltración directa producida en el terreno). Sin embargo, se supone que el flujo es esférico alrededor de la rejilla durante el ensayo. Es importante asegurarse que lo que se mide es la permeabilidad del terreno y no la dificultad del paso del agua por las ranuras practicadas en la tubería y de la zona alterada en la perforación realizada en el material (efecto piel), hecho comprobable si se conoce la ranuración de la tubería introducida (como así es) y las condiciones de colmatación. El método Gilg-Gavard consiste



en introducir agua, desde un nivel inicial, en el piezómetro hasta una determinada altura e ir midiendo la evolución temporal de la recuperación de los niveles con respecto al nivel inicial hasta alcanzar éste.

Los valores de las permeabilidades calculadas en los ensayos ejecutados proporcionan una idea bastante razonable del funcionamiento hidrodinámico de la parte superficial de la escombrera. En general se puede asegurar con bastante aproximación a la realidad que el terreno se comporta como un limo, con un valor medio de permeabilidad de  $6.21 \cdot 10^{-7}$  m/s, desde un punto de vista de caracterización hidráulica, a pesar de la heterogeneidad granulométrica del material que conforma la escombrera exterior. Ello significa que es un medio poco permeable, que drena mal.

Así, el terreno superficialmente actúa como un acuitardo de potencia variable que regula la infiltración a las partes más profundas, hecho que se ha podido comprobar *in situ*. La zona se muestra con bastante encharcamiento (detención superficial) en las bermas con baja o ninguna pendiente. Por ello, lo que se genera principalmente es escorrentía hipodérmica o escorrentía epidérmica superficial, que aflora alimentando los cauces de los arroyos situados a pie de talud.

La percolación del agua infiltrada en la escombrera recargará la zona del zócalo geológico, dependiendo de la permeabilidad de éste, la cual es función, a su vez, de la existencia de fracturas y de la porosidad en la matriz. En este caso las aportaciones al medio geológico en forma de recarga van a estar muy menguadas, puesto que en la zona más profunda el material de la escombrera estará más compacta al sufrir el peso de la columna de todo el material que tiene encima, por lo que es de esperar que la permeabilidad en las profundidades, y cerca del zócalo geológico, sea aún más pequeña, lo que se traduce en menos capacidad de transmisión del medio.

## Estudio de la descarga subterránea hacia el lago minero

Con el fin de caracterizar el zócalo geológico se han realizado dos ensayos de bombeo en dos pozos situados en la zona comprendida entre la escombrera exterior y el lago (B-06007 y B-08009, Figura 1), de tal forma que en dicha zona los sondeos están perforados en el zócalo geológico original y natural. Es una zona ajena al desescombros del material estéril extraído de la mina. En consecuencia se ha podido estudiar la influencia del flujo subterráneo procedente de la recarga del agua infiltrada en la escombrera, y que alcanza dicho medio natural, sobre el agua del lago.

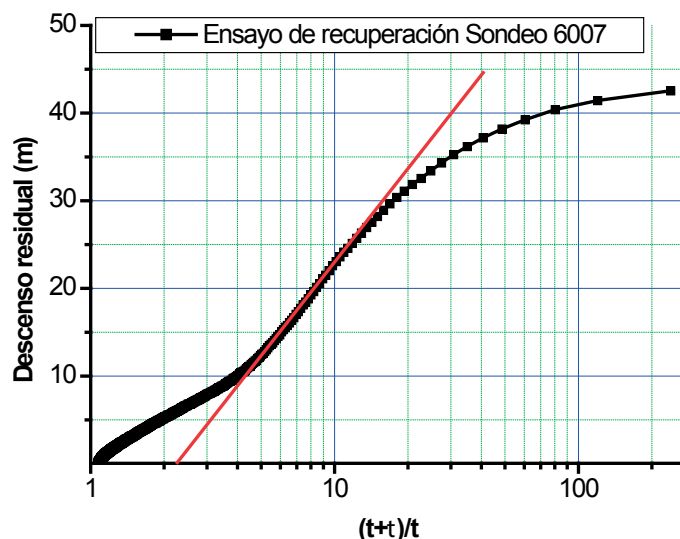
Los pozos donde se han realizado los ensayos están situados a ambos lados de la posible zona de flujo subterráneo dirigido desde la escombrera hacia el hueco minero (Figura 1), por lo que los resultados obtenidos son bastante representativos del medio, sobre todo cuando la geología perforada y el grado de alteración en ambos pozos es la misma, es decir hidrodinámicamente el material es el mismo. El material geológico que atraviesa ambos pozos tiene características similares, estando constituido principalmente por filitas gris oscura (Ordovícico) seguida por material terciario cabalgado y posteriormente filita gris; se presenta muy compacto sin esquistosidad definida.

Ambos pozos alcanzan profundidades entre 100 y 190 m con un diámetro de entubado comprendido entre 28 y 34 cm. Las tuberías introducidas están ranuradas en tramos alternativos y los pozos están clausurados en el fondo mediante tapa soldada.

Los ensayos de bombeo ejecutados han consistido en la extracción instantánea, mediante bombeo, dado la baja capacidad permeable del terreno, y la medición de la recuperación del nivel una vez parado el bombeo mediante una sonda limnimétrica de funcionamiento en continuo. El caudal extraído en los bombeos ha sido siempre superior al flujo proveniente del medio hacia los pozos. El estudio de la recuperación del nivel del agua en un pozo después del cese del bombeo supone aplicar la teoría de superposición (Custodio y Llamas, 1983). El cese del bombeo equivale a continuar el bombeo pero poniendo en el momento de paro un pozo similar que recargue el mismo caudal.

Así, se han estimado los descensos residuales (diferencia entre el nivel inicial en el que se encontraba el agua antes del bombeo y los valores que va alcanzando al cesar la extracción), por ejemplo en el ensayo realizado en el pozo B-06007 (Figura 8). Para la realización del ensayo se midió el nivel inicial con respecto al emboquille antes del bombeo. En este caso, el nivel del agua se encontró a 38.73 m y se bajó la sonda de medición a 110 m. La bomba se situó a 180 m. Se comenzó el bombeo con un caudal constante de 6.66 l/s durante 79 minutos, momento a partir del cual se paró la bomba.

De la Figura 8 se puede deducir que dicha curva corresponde a la recuperación del nivel en el ensayo de bombeo de un pozo incompleto en un medio semiconfinado o acuífero libre en el que no existe recarga, característica que se deduce al pasar la curva por el punto (descenso residual =0;  $(t+t)/t=1$ ).



**Figura 8** | Descensos residuales en el ensayo de bombeo del pozo B-06007.

La recuperación del pozo ha sido originada por el aporte de agua de zonas más alejadas y no de recarga. La recarga en la zona de influencia del pozo es nimia o despreciable. La permeabilidad estimada es  $K=2.12 \cdot 10^{-7}$  m/s, que corresponde con el comportamiento de un limo arcilloso,

Para el caso del pozo B-08009 el nivel inicial del agua fue 9.21 m y la sonda de medición se instaló a 56 m. La bomba se situó a 82 m. El caudal se bombeó con una bomba de 9 kW y fue 6.66 l/s durante 31 minutos, momento a partir del cual se paró la bomba. La captación es incompleta siendo el valor de permeabilidad estimada es  $K=1.41 \cdot 10^{-7}$  m/s, que corresponde también con el comportamiento de un limo arcilloso

Los parámetros estimados de los anteriores ensayos son del mismo orden de magnitud, lo que proporciona una idea cualitativa que corrobora lo observado en los taludes del hueco minero por la zona donde se encuentran ambos pozos. Dichos taludes pueden ser considerados como verdaderas calicatas, donde aflora un material formando cárcavas, completamente erosionado por el paso del agua en forma de escorrentía superficial y que no se infiltra, o se infiltra con dificultad.

Existe una potencia de unos 100 m del terreno o zócalo geológico que actúa como una verdadera barrera a la infiltración de agua. La transmisión subhorizontal también es baja, hecho corroborado por la tendencia lenta de recuperación del nivel.

En conclusión, el zócalo geológico presenta aún menor permeabilidad que la escombrera, cuyo valor medio es  $1.6 \cdot 10^{-7}$  m/s, valor típico de un limo arcilloso, por lo que dicho zócalo se presenta como una barrera entre el lago y la escombrera exterior.

## Estudio hidroquímico en el zócalo geológico

Con el fin de evaluar la conexión existente entre las aguas de la escombrera exterior con las existentes en el zócalo geológico y, así, conocer la influencia de dichas aguas sobre las aguas que están rellenando el hueco minero, se procedió a la realización de análisis de las aguas existentes en los pozos durante tres años. La calidad de las aguas existentes en el zócalo geológico es la propia agua natural del medio.

Se trata, en este caso, de evaluar la calidad de las aguas procedentes de la descarga, y la influencia de los lixiviados sobre el sustrato geológico, al ser éste el medio transmisor de la descarga hacia el lago.

En la Tabla 1 se muestran los resultados medios obtenidos en el período 2007-2012 correspondientes a los pozos comparados con los medidos en aguas subterráneas existentes en otros pozos ubicados en filitas grises. Comparando los resultados, el pH medido en el pozo B-08009 es sustancialmente muy distinto que el de las muestras tomadas en el pozo B-06007, rondando el pH alrededor de un 6.2, como valor medio. Dicho valor del pH está relacionado con mayores valores del Fe y del Mn en disolución.

Las diferencias en el pH puede deberse a la distinta profundidad a la que se tomaron las muestras. El pozo B-06007 está a menor cota que el B-08009, exactamente, a 17 m menos. Por otra parte el nivel en el pozo B-06007 se encuentra a 43 m y las muestras se tomaron a 15 m por debajo del nivel piezométrico, es decir a 58 m con respecto a la superficie del terreno.

El pozo B-08009, situado a mayor cota, tiene el nivel del agua más somero, en concreto a 10 m del emboquille. Las muestras se tomaron a 10 m con respecto a dicho nivel, es decir, a 20 m de la superficie del terreno, lo que indica que va a ser más vulnerable pues el agua está más en contacto con la superficie. En el caso del pozo B-06007 existen 43 m de zona no saturada, lo que supone un tramo de protección contra la difusión de lixiviados.

Sin embargo, comparando los resultados con los aportados en otros pozos situados en la zona de filitas grises (Juncosa *et al.*, 2014), se puede comprobar que se encuentran dentro del rango de los valores de referencia (Juncosa *et al.*, 2014), lo que implica que dichos pozos no se hayan influenciados por las posibles aguas procedentes de los lixiviados de la escombrera y, en consecuencia, tampoco las aguas del lago minero.

**Tabla 1** | Parámetros físicoquímicos seleccionados de las aguas analizadas en los pozos comparados con las naturales subterráneas existentes con la misma geología. Temp: temperatura (°C); C.E.: conductividad eléctrica (µS/cm); TSS: Total sólidos en suspensión (mg/l). Concentraciones en mg/l.

	Pozo B-06007	Pozo B-08009	Valores de referencia
T (°C)	14.8	13.9	13.0 – 14.2
O <sub>2</sub>	4.3	2.5	2.9 – 6.3
pH	8.1	6.2	6.1 – 7.8
TSS	40	17.8	4 – 57
C.E.	503	380	367 – 820
Sulfatos	80	98	76 – 297
Fe	< 0.1	12.1	0.1 – 24
Al	< 0.3	< 0.3	0.025 – 0.15
Mn	0.18	0.9	0.2 – 0.9

## DISCUSIÓN

De los estudios de caracterización realizados hay que hacer constar que no se ha podido determinar los parámetros hidrodinámicos del propio material que conforma la escombrera, pero sí su cobertera. Así mismo, tampoco se han podido determinar los coeficientes de almacenamiento tanto de la cobertera de la escombrera, al haber realizado ensayos Gilg-Gavard, como del zócalo geológico.

En cuanto a la conexión hidrogeológica entre la escombrera exterior y el zócalo geológico, se puede decir ésta existe pero que su entidad no se ha podido determinar cuantitativamente, aunque sí cualitativamente. De esta forma se puede asegurar que la escombrera actúa como un acuitardo, donde una parte del agua infiltrada alcanza el zócalo geológico y se incorpora al flujo subterráneo. Aun desconociendo la recarga procedente de la escombrera que puede alcanzar al zócalo se ha podido analizar cualitativamente el funcionamiento del sistema:

1. La escombrera exterior se comporta como un acuitardo donde la mayor parte del agua se transmite en forma de escorrentía superficial e hipodérmica, emanando en los recalces de los taludes de las bermas y siendo reconducidas por el sistema de zanjas y canales de drenaje construidos en la misma escombrera exterior.
2. El agua neta que no se mueve, como por ejemplo la que cae en las bermas (extrayendo la interceptada por las plantas), se detiene superficialmente encharcando la zona. Este agua, o bien se infiltra o bien se evapotranspira.
3. El agua infiltrada puede seguir dos caminos: subsuperficialmente, puede alcanzar el pie del talud y emanar en la berma situada a una cota inferior, o puede llegar a partes más profundas, donde el material está más compactado.
4. Este agua que percola puede alcanzar el zócalo y, al ser éste menos permeable que el material suprayacente, escurrir por el fondo de la escombrera (interfaz de escombrera – zócalo) hasta emanar nuevamente por las zonas de cota baja.
5. En caso de que alcance la zona del zócalo, estas aguas profundas de la escombrera se incorporarían a una masa de agua mayor, diluyéndose el material lixiviado que pudiese llevar en disolución.
6. Por otro lado, el agua que alcanza el zócalo subyacente de la escombrera exterior y que pueda transmitirse hacia el hueco minero depende en gran medida de la diferencia de cota piezométrica existente entre el zócalo y el lago, por lo que cuanto más lleno el lago menos gradiente.
7. Se ha podido comprobar que los pozos existentes entre la escombrera y el lago no presentan influencia química de los lixiviados procedentes de la escombrera lo que corrobora el análisis planteado

---

## CONCLUSIONES

Los piezómetros existentes en la escombrera exterior están repartidos homogéneamente en la superficie de la misma en distintas bermas, por lo que el valor medio de permeabilidad obtenido es representativo de la cobertera superficial de la misma. Con respecto a los pozos donde se han realizado los ensayos de bombeo, éstos están situados a ambos lados de la posible zona de flujo subterráneo dirigido desde la escombrera hacia el hueco minero, por lo que los resultados obtenidos son bastante representativos del medio (zócalo geológico), sobre todo cuando la geología perforada y el grado de alteración en ambos pozos es la misma, es decir hidrodinámicamente el material es el mismo.

También es lógico y razonable deducir que la recarga de agua en el zócalo geológico situado debajo de la escombrera es pequeña, sobre todo, teniendo en cuenta que el material más profundo de la escombrera está más compactado, por lo que es de esperar que la permeabilidad sea menor que en superficie de la misma, donde la permeabilidad media estimada en toda la superficie es algo superior (doble y triple valor) que la estimada para el zócalo geológico. La conexión entre la escombrera exterior y el zócalo geológico subyacente se puede estudiar a partir de los análisis químicos de muestras tomadas en ambos pozos (B-06007 y B-08009) y de la escombrera exterior.

De los resultados obtenidos se puede concluir que las subterráneas del entorno son de muy bajas concentraciones en solutos o mineralizaciones muy débiles, con pH característicos del material filítico que conforma el zócalo geológico.

El agua muestreada en los pozos difiere sustancialmente, las del pozo B-06007 son, en pautas generales, débilmente básicas y más profundas con respecto a la superficie del terreno, y las del pozo B-08009, son de carácter débilmente ácido y someras, correspondientes al medio geológico. Se deduce que no hay interacción con las posibles aguas que pudiesen proceder de la recarga de lixiviados procedentes de la escombrera.

---

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado dentro de un Convenio de Investigación financiado por ENDESA GENERACIÓN para el desarrollo y caracterización de las aguas subterráneas y procedentes de la escombrera exterior de la mina de As Pontes, La Coruña.

---

## REFERENCIAS

Álvarez-Campana, J.M., Ramos, A. (2007). Restauración de minas de lignito. Los casos de As Pontes y Meirama (A Coruña, España). *VIII Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero. Nuevas perspectivas para la protección y desarrollo del legado minero y geológico*. Mieres, Asturias, 13-16 de septiembre de 2007.

Custodio, E., Llamas, M.R. (1983). *Hidrología subterránea*. Omega

Juncosa, R., Delgado, J., Menéndez, J., Valle, R. (2014). Caracterización de la calidad química de las aguas subterráneas en el entorno del lago de As Pontes de García Rodríguez (La Coruña). *Congreso Internacional de las Aguas Subterráneas (CIAS2014)*, Valencia 8-10 de septiembre de 2014. ISBN: 978-84-9048-239-1.

Weight, W. D. 2009. *Hydrogeology Field Manual*. Mc Graw Hill

