

## DRENAJE ÁCIDO DE AGUAS LIXIVIADAS DESDE EL TERRAPLÉN DEL APARRAL DE LA AUTOVÍA AG-64: ESTUDIO HIDROLÓGICO Y DE LA CONTAMINACIÓN DEL RÍO CHAMOSELO (AS PONTES, A CORUÑA)

Jorge Dafonte<sup>1</sup>, Héctor Dopico<sup>2</sup>, Javier Samper<sup>3</sup>, Luis Montenegro<sup>3</sup>, Bruno Pisani<sup>3</sup>, Alba Mon<sup>3</sup> y Acacia Naves<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Santiago de Compostela. Departamento de Ingeniería Agroforestal. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería. Benigno Ledo s/n. 27002 Lugo. e-mail: [jorge.dafonte@usc.es](mailto:jorge.dafonte@usc.es).

<sup>2</sup>Intacta Gestión Ambiental. Edif SEARA. P.I. Penapurreira. 15320 As Pontes A Coruña. e-mail: [h.dopico@intacta.es](mailto:h.dopico@intacta.es).

<sup>3</sup>Centro de Investigaciones Científicas Avanzadas (CICA), Escuela de Caminos, Canales y Puertos, Universidade da Coruña, Campus de Elviña s/n 15071 A Coruña. e-mail: [j.samper@udc.es](mailto:j.samper@udc.es).

**RESUMEN.** Las aguas de los ríos Eume y Chamoselo, a su paso por As Pontes (A Coruña), se vieron muy acidificadas a partir de 2008 debido a los aportes de aguas ácidas que estuvieron en contacto con los estériles sulfurosos de la construcción de la autovía AG-64. Estos estériles se utilizaron como material competente y de relleno en toda la autovía. Este trabajo se centra en el terraplén del Aparral, cuya construcción provocó que el pH natural del arroyo del Aparral de 6.5 bajara hasta 2.3. Desde entonces el pH del río Chamoselo se corrige añadiendo hidróxido cálcico en varios puntos de su cuenca. Esta contribución presenta los trabajos realizados para identificar las posibles fuentes y los flujos de agua causantes de las aguas ácidas que incluyen el drenaje del propio terraplén y la interacción de las aguas subterráneas con los rellenos del terraplén. El objetivo final es reducir los flujos de agua a través del relleno para reducir al máximo los caudales de agua a tratar.

**ABSTRACT.** Surface waters of the Eume and Chamoselo rivers at As Pontes (A Coruña) have been severely affected by acidity episodes since 2008 due to water leaching through the sulfidic materials used for the construction of AG-64 highway. The sulfidic materials were disposed at several sites as landfills and embankments. The construction of the Aparral embankment led to a decrease of the pH of the Aparral creek from 6.5 (natural) to 2.3. Remediation measures have been implemented since then by adding calcium hydroxide in surface waters at several locations in the Chamoselo basin. Here we present the work done so far to identify and quantify the solid sources and the water flows causing the acidity of the waters in the embankment. The ultimate objective is to reduce the water flows through the embankment in order to minimise the water treatment.

### 1.- Introducción

Las aguas de los ríos Eume y Chamoselo, a su paso por As Pontes (A Coruña), se vieron muy acidificadas a partir de 2008 debido a los aportes de aguas ácidas de la escorrentía superficial y subterránea que estuvieron en contacto con los estériles de la construcción de la autovía AG-64 Ferrol-Vilalba que contenían sulfuros (principalmente pirita, FeS<sub>2</sub>).

La construcción del terraplén del Aparral provocó que el pH normal del arroyo de Aparral (en torno a 6.5) bajara a un pH de alrededor de 2.3. El nivel freático de la zona está muy próximo a la superficie por lo que los materiales del relleno

se pueden inundar con aguas subterráneas. Para restaurar las condiciones naturales del río se viene añadiendo una solución de hidróxido cálcico de forma controlada en varios puntos de la cuenca del río Chamoselo. En la Fig. 1 se muestra la localización del terraplén del Aparral y de la cuenca del río Chamoselo en el municipio de As Pontes (A Coruña).



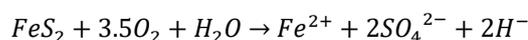
Fig. 1. Situación del terraplén del Aparral (derecha) y de la cuenca del río Chamoselo (centro) en As Pontes (izquierda).

El drenaje ácido de rocas en la construcción de infraestructuras constituye un problema técnico y ambiental de primera magnitud. Los problemas técnicos más importantes son la corrosión de los metales y del hormigón, y la erosión de taludes debido a la ausencia de vegetación. Sus efectos ambientales son muy negativos sobre la calidad del agua y los organismos acuáticos (Orndorff y Daniels, 2004). Para abordar estos problemas, se han elaborado guías para la gestión de terrenos sulfurosos en Estados Unidos, Australia y Canadá (Orndorff, y Daniels, 2004; Roads and traffic authority NSW, 2005)

El drenaje ácido de rocas deteriora la calidad del agua debido a la oxidación de los sulfuros metálicos. El pH del drenaje ácido de las rocas normalmente varía entre 2 y 4 (Nordstrom y Alpers, 1999). Muchos metales se convierten en solubles en condiciones ácidas. Los minerales piríticos se oxidan cuando son expuestos al aire y provocan el drenaje ácido de rocas. Los principales metales causantes del drenaje ácido de rocas son la pirita (FeS<sub>2</sub>), la marcasita (otra forma de FeS<sub>2</sub>), y la pirrotita (Fe<sub>9</sub>S<sub>8</sub>).

La meteorización de la pirita empieza con la exposición de la pirita al oxígeno y al agua. La pirita es menos reactiva si está sumergida en agua. En general, el drenaje ácido es producido por la exposición de las rocas piríticas a ciclos repetidos de humectación/deseccación y a la acción de las bacterias presentes en la superficie de la tierra. (Hammastron et al. 2005)

La reacción inicial de oxidación de la pirita es:



Posteriormente, el hierro ferroso se oxida a hierro férrico

por acción de las bacterias. Este hierro férrico es un potente oxidante que ataca a la pirita y a otros minerales, liberando notables cantidades de hierro ferroso (Hammastron et al. 2005).

El problema causado por el drenaje ácido de las aguas lixiviadas desde el terraplén del Aparral se encuentra localizado en As Pontes de García Rodríguez (A Coruña). En el entorno de la zona de estudio hubo una explotación para la extracción de lignito que ya presentaba problemas de drenaje ácido en las escombreras debido al elevado contenido en sulfuros de los estériles de la mina (Samper et al. 2008a,b).

Para acotar e identificar el origen del drenaje ácido y proponer soluciones al problema en el terraplén del Aparral, se llevaron a cabo las siguientes tareas: (1) La utilización de diferentes técnicas geofísicas como la tomografía eléctrica resistiva y la polarización inducida para definir la variabilidad espacial de la geología del subsuelo, (2) La instalación de aforadores aguas arriba y abajo del terraplén del Aparral, (3) La realización de un modelo hidrológico en la cuenca del río Chamoselo con el código VISUAL BALAN; y (4) El análisis de los datos disponibles de niveles piezométricos y de pH medidos desde el año 2016 en una red de 18 piezómetros situados en la zona de estudio.

La tomografía eléctrica resistiva se ha convertido en una técnica muy usada en ingeniería y en aplicaciones ambientales en los últimos veinte años debido a que es un procedimiento de campo rápido y sencillo y que en combinación con la disponibilidad de programas de inversión de datos (Dahlin y Loke, 2015), permite no solamente la medida de la resistividad eléctrica, sino también la polarización inducida en el dominio del tiempo.

La polarización inducida es una técnica geofísica que mide el lento descenso del voltaje en el subsuelo después del cese de un pulso de excitación eléctrica. La corriente eléctrica se inyecta en el suelo igual que en el método de resistividad eléctrica. El agua dentro de las fisuras y poros del material geológico permite para ciertos materiales geológicos mostrar un efecto que se conoce como polarización inducida cuando se aplica una corriente eléctrica. Durante la aplicación se producen reacciones electroquímicas dentro del terreno y se almacena energía eléctrica. Cuando se interrumpe la corriente eléctrica, la energía eléctrica almacenada se descarga provocando un flujo de corriente dentro del terreno. Los equipos miden este flujo de corriente. El material del subsuelo actúa como un gran condensador (Department of Environmental Protection, 2005).

El efecto de la polarización inducida en el dominio del tiempo se expresa mediante la cargabilidad, que mide el voltaje de caída después de cortar la corriente eléctrica aplicada al terreno (Gonzales Amaya et al. 2016). Se puede usar una combinación de las medidas de resistividad eléctrica y polarización inducida, ya que la polarización inducida tiene una respuesta a la presencia de sulfatos. Además, se pueden utilizar los valores obtenidos del modelo de cargabilidad para estimar la distribución de sulfatos en el perfil (Yubal y Oldenburg, 1996).

Para cuantificar el volumen de agua afectado por los lixiviados de materiales ácidos es necesario cuantificar la

escorrentía total de una cuenca y sus componentes (escorrentía superficial, subsuperficial, y subterránea) y los recursos subterráneos. Para ello, se pueden utilizar modelos hidrológicos de balance (Samper et al. 1999, 2011a,b).

En esta comunicación se presentan los trabajos realizados para identificar las posibles fuentes y los flujos de agua causantes de las aguas ácidas. Los posibles flujos incluyen el drenaje del propio terraplén y los flujos desde (hacia) el medio subterráneo subyacente hacia (desde) los rellenos del terraplén que contienen materiales piríticos. El objetivo final es reducir los flujos de agua a través del terraplén para minimizar los caudales de agua a tratar.

## 2.- Descripción de la zona de estudio

La zona de estudio se encuentra situada en la cuenca Terciaria de As Pontes que, con una extensión de 12 km<sup>2</sup>, es una de las cuencas terciarias más pequeñas existentes en el NO de la Península Ibérica (Macías-García et al. 2007). El sustrato litológico de la cuenca y su entorno está formado por bandas de filitas y pizarras paleozoicas con contenidos variables de sulfuros (<0.1-3% de azufre pirítico), con predominio de valores inferiores a 0.4% (Monterroso, 1995). La Figura 2 muestra la geología de la zona de estudio.



Fig. 2. Mapa geológico de la zona de estudio, traza de la autovía AG-64 y situación de los piezómetros.

En el año 2008 se inauguró el tramo As Pontes de García Rodríguez-Cabreiros de 9.7 km de longitud de la autovía AG-64 (Ferrol-Vilalba). Durante la construcción de este tramo se excavó una enorme trinchera en la zona de “Os Airios” con una profundidad máxima de 50 m (Fig. 3). De esta trinchera se extrajo un volumen de 1.8 hm<sup>3</sup> de pizarras con contenidos variables de minerales piríticos. Una parte de este material se utilizó como relleno en un vertedero (0.5 hm<sup>3</sup>) y en el polígono de “Os Airios” (0.3 hm<sup>3</sup>) situados en As Pontes. El resto de este material se utilizó como relleno y como material competente en la base de todo el trazado de este tramo de 9.7 km de autovía (1 hm<sup>3</sup>). Para la construcción del terraplén del Aparral (Fig. 4) se utilizó como material competente el material excavado de la trinchera de “Os Airios”. Se retiró una capa de 1 m de espesor de suelo natural para el saneo de la base del terraplén (Fig. 5). Una vez finalizada la obra del terraplén, se impermeabilizaron los taludes.

Las aguas de los ríos Eume y Chamoselo, a su paso por As Pontes (A Coruña), se vieron muy acidificadas a partir de 2008 debido a la escorrentía superficial y subterránea procedente de los materiales de relleno y saneo utilizados en la construcción de la autovía AG-64. Estos vertidos ácidos procedentes del drenaje ácido de rocas afectan a la cuenca del río Chamoselo principalmente a través de dos de sus afluentes: el arroyo del Aparral y el arroyo de Lavadoiro. El río Chamoselo es a su vez afluente del río Eume. La cuenca del río Chamoselo tiene una superficie de 30 km<sup>2</sup>. Para neutralizar la acidez del río Chamoselo se controla en continuo el pH en la cuenca en 35 puntos y se vierten 400 t/año de hidróxido cálcico en 7 puntos de dosificación.



Fig. 3. Trinchera de "Os Airios" (Fuente: Google Street View).



Fig. 4. Ortofoto del terraplén de Aparral en 2007 (Fuente: PNOA-IGN).

En la Fig. 5 se muestra un esquema de la composición del terraplén del Aparral y del material subyacente. En el perfil se incluye: (1) La roca del terreno natural, (2) La capa de suelo natural, (3) La capa de saneo en la base del terraplén (material competente) añadida después de retirar una capa de suelo original de 1 m de espesor. El material de saneo consiste en material pétreo de elevada resistencia a la compresión procedente de la trinchera de "Os Airios" y, (4) Los materiales del relleno procedentes de la citada trinchera.

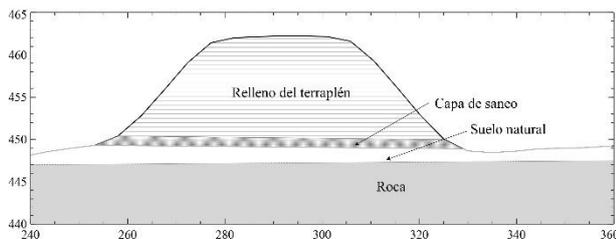


Fig. 5. Perfil transversal del terraplén del Aparral en el que se indican los principales materiales.

### 3.- Trabajos de campo

Se dispone en la zona de una red de 18 piezómetros, de los cuales los piezómetros P24, P25 y P29 se encuentran en el entorno del terraplén del Aparral y los piezómetros P30, P32 y P33 se encuentran en un área de descanso próxima (Fig. 6). En estos piezómetros se realizan medidas de nivel piezométrico y de pH con una periodicidad mensual desde el año 2016.

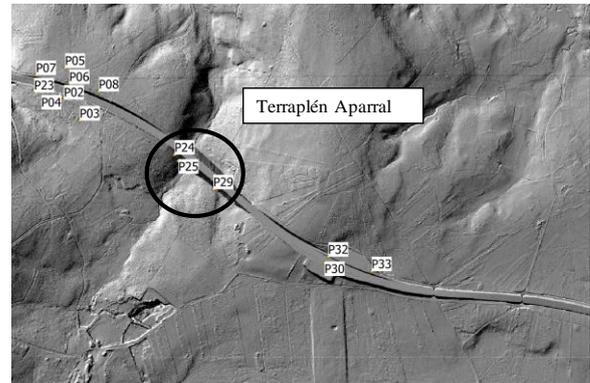


Fig. 6. Mapa de situación del terraplén y de los piezómetros.

Se han realizado aforos en el río Chamoselo antes de su confluencia con el río Eume. Los datos de aforo se obtuvieron mediante el registro en continuo del calado en una sección transversal del cauce de la que se conoce su curva de aforo. Los datos de aforo corresponden al período comprendido entre el 1/9/2016 y el 31/8/2017, en el que la precipitación media anual ha sido igual a 1600 mm.

Se instalaron también dos aforadores de tipo RBC (Clemmens et al. 1984) para la medida del caudal del arroyo del Aparral, que atraviesa el terraplén. El aforador situado aguas arriba del terraplén mide el caudal del arroyo. El régimen de caudales del arroyo está muy modificado por los trabajos de explotación de varias graveras. El aforador situado aguas abajo del terraplén mide los caudales de escorrentía procedentes del terraplén y de las cunetas del pie de la ladera próxima.

Se utilizó la técnica de tomografía eléctrica con un equipo Terrameter SAS 1000 (ABEM) junto con un selector de electrodos ES 10-64. Los electrodos metálicos tenían una separación y una apertura de alas de 300 m. Los datos medidos de resistividad eléctrica y cargabilidad aparente se invirtieron mediante el código RES2DINV para obtener un modelo 2D de los datos de resistividad real y cargabilidad. El protocolo elegido para realizar la medida fue el de Wenner-Schlumberger

Se realizaron dos transectos el 15 de marzo de 2019, uno aguas arriba y otro aguas abajo del terraplén. Aguas arriba del terraplén se midió solamente la resistividad eléctrica aparente y aguas abajo del terraplén se midieron la resistividad eléctrica aparente y la cargabilidad. No se midió la cargabilidad en el perfil situado aguas arriba del terraplén ya que en las medidas anteriores no se apreciaron diferencias importantes en los valores a lo largo del perfil.

Se utilizó también la técnica de polarización inducida. El

tipo de medida realizada fue en el dominio temporal y el índice utilizado fue la cargabilidad (en milisegundos). Este parámetro se define como la relación del área bajo la curva de agotamiento (en mV-s) con la diferencia de potencial (en mV) medida antes de apagar la corriente aplicada.

#### 4.- Resultados y discusión

##### 4.1- Geofísica

La Fig. 7 muestra el perfil de los modelos de resistividad eléctrica y cargabilidad en el perfil realizado aguas abajo del terraplén corregido con la topografía. Se aprecian valores de resistividad eléctrica del terreno muy bajos, lo que indica que el terreno está próximo a la saturación. En las medidas de cargabilidad se han obtenido muchos valores negativos, lo cual habitualmente se supone como indicador de una mala calidad de la medida. No obstante, según Dahlin y Loke (2015), los datos de cargabilidad negativos pueden ser el resultado de una distribución de las zonas de cargabilidad en relación a la distribución de sensibilidad, por lo que los datos negativos no deberían de ser eliminados antes de la inversión. En la Fig. 7 (abajo) se aprecia en el modelo de cargabilidad una zona central con un valor elevado de cargabilidad. Yubal y Oldenburg (1996) identificaron estas zonas de alta cargabilidad con la presencia de materiales con contenido de sulfatos en una mina en Canadá y utilizaron los datos de cargabilidad para estimar la cantidad y distribución de sulfatos.

En el estudio geofísico del terreno en el transecto realizado aguas abajo del terraplén del Aparral no se ha podido establecer la relación entre cargabilidad y presencia de sulfatos ya que no se dispone de medidas de concentración de sulfuros en los materiales de relleno utilizados en la construcción del terraplén del Aparral.

##### 4.2- Modelo hidrológico

Se ha realizado un modelo hidrológico utilizando los datos de caudal medidos antes de la confluencia del río Chamoselo en el río Eume. El modelo hidrológico de balance hídrico se realizó con el código VISUAL-BALAN v2.0 (Samper et al. 1999; Espinha Marques et al. 2010). Este programa calcula balances diarios de agua en el suelo, la zona no saturada y el acuífero, utilizando como datos entrada los datos meteorológicos. Las componentes del balance se resuelven secuencialmente comenzando por las correspondientes al suelo y finalizando por las del acuífero. El programa permite obtener los valores diarios de todas las componentes del balance, así como de las oscilaciones del nivel freático en el acuífero. Este código se viene utilizando ampliamente en la Península Ibérica y en Latinoamérica para la evaluación de los recursos hídricos, la estimación de la recarga y la evaluación del impacto hidrológico del cambio climático (Alvares y Samper 2009, Alvares et al. 2009; Espinha et al. 2009, 2010; Pisani et al. 2011, 2013, 2017; Samper et al.

1999, 2011a,b).

El modelo hidrológico se calibró con los datos diarios de aforo en el río Chamoselo. De acuerdo con los criterios presentados por Moriasi et al. (2007), el ajuste del modelo es aceptable ya que el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe es igual a 0.5. No obstante, Ritter y Muñoz-Carpena (2013) advierten que el error de un modelo no varía linealmente con el índice de eficiencia.

La Fig. 8 muestra la comparación de los caudales calculados y los medidos y la Fig. 9 muestra los valores medios anuales de las componentes del balance de agua en la cuenca del río Chamoselo. Hay que destacar la importancia del flujo hipodérmico, que supone el 42.2% de las aportaciones totales. Estos resultados son coherentes con los resultados obtenidos en las modelizaciones realizadas en otras cuencas de Galicia (Samper et al. 2015; Raposo et al. 2011).

##### 4.3- Niveles piezométricos y pH

Para analizar con detalle los posibles flujos de aguas ácidas, se realizó un análisis de los datos de los niveles piezométricos y de pH de los siguientes piezómetros:

(1) Los piezómetros P24, P25 y P29 situados en el terraplén del Aparral y afectados por el drenaje de aguas ácidas.

(2) Los piezómetros P30, P32 y P33 situados en el área de descanso de la autovía AG-64 y afectados por el drenaje de aguas ácidas.

(3) Los piezómetros P3 y P5 situados en una zona aparentemente no afectada por las obras de la autovía AG-64 y los drenajes de aguas ácidas.

La Fig. 10 (superior) muestra la evolución temporal de los niveles piezométricos y del pH en los piezómetros P3 y P5 que se encuentran alejados de la autovía AG-64. Los niveles piezométricos varían a lo largo del año, siendo los mínimos en el verano y en el comienzo del otoño y los máximos en invierno. Las fluctuaciones del nivel son del orden de 3.5 m en el P3 y 7.5 m en el P5. Los datos de pH de estos dos piezómetros son los más elevados de todos los piezómetros. Generalmente, varían entre 5 y 7. Sus valores medios son 6.35 en el P3 y 5.92 en el P5. Se desconocen las causas de las fuertes fluctuaciones del pH de casi 2 unidades en el P3 en el año 2016. Las fluctuaciones de pH en el año 2018 fueron menores.

La Fig. 10 (intermedia) muestra la evolución temporal de los niveles piezométricos en los piezómetros P24, P25 y P29 situados en el terraplén del Aparral y afectados por el drenaje de aguas ácidas. Los niveles piezométricos varían a lo largo del año, siendo los mínimos en el verano y al comienzo del otoño y los máximos en invierno. Las fluctuaciones del nivel son del orden de 4.7 m en el P24, 2.75 m en el P25 y solo de 1.15 m en el P29. Los niveles medios son iguales a 445.8 m en el P24, 446.4 m en el P29 y 439.4 m en el P25.

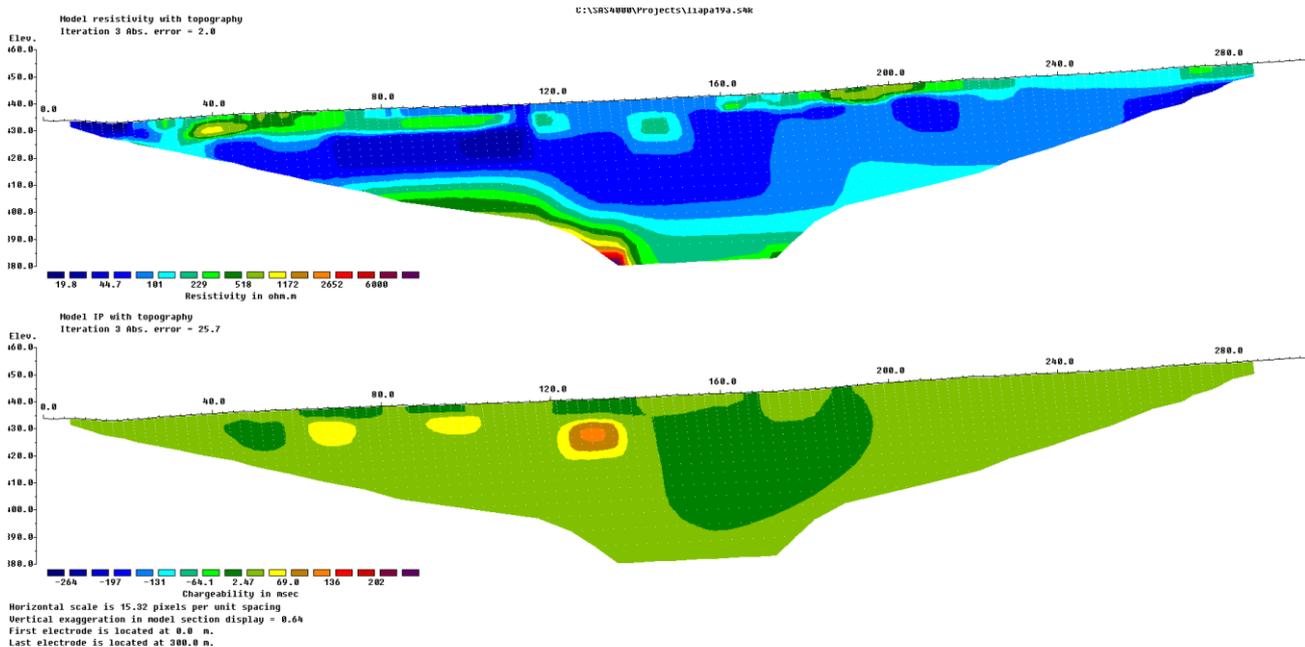


Fig. 7. Perfil del modelo de resistividad eléctrica (arriba) y cargabilidad (abajo) del terreno en el transecto realizado aguas abajo del terraplén del Aparral.

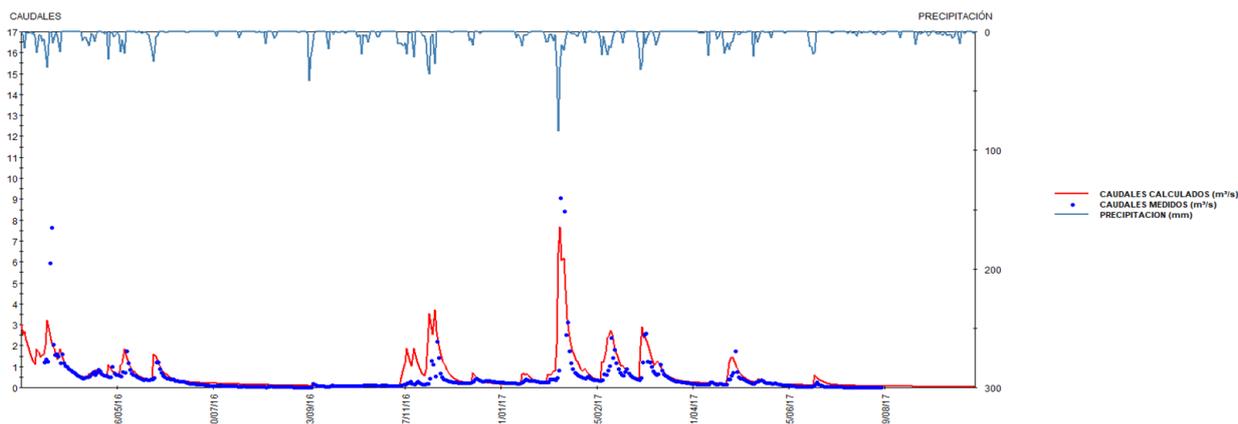


Fig. 8. Evolución temporal de los caudales calculados (línea) y medidos (símbolos) en el río Chamoselo.

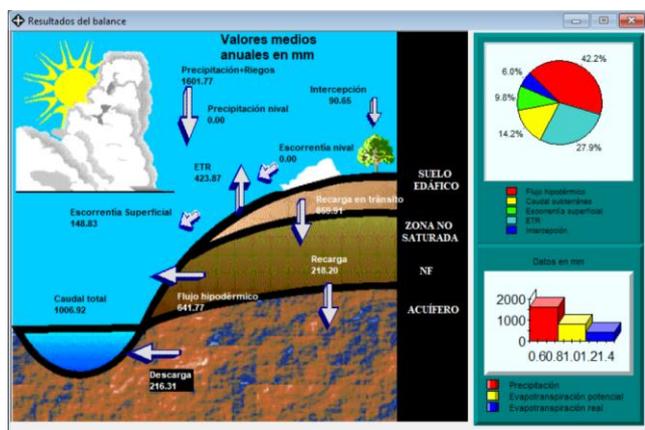


Fig. 9. Valores medios anuales de las componentes del balance de agua en la cuenca del Chamoselo calculadas con el modelo hidrológico de balance.

Los datos de pH de los piezómetros P24, P25 y P29 son muy bajos a pesar de que estos piezómetros se encuentran aguas arriba del terraplén. Los datos de pH de los piezómetros P24 y P25 muestran tendencias temporales muy similares. Generalmente, varían entre 2.42 y 2.95 en el P24 y entre 2.27 y 3.02 en el P25. Sus valores medios son 2.74 en el P24 y 2.71 en el P25. Por otro lado, los datos de pH en el piezómetro P29 presentaron fuertes oscilaciones en 2016 y 2017. Se desconocen las causas de las fluctuaciones de pH en el P29. En este piezómetro el pH varía entre 3.53 y 5.55. El valor medio es igual a 4.27. Hay que reseñar que este piezómetro P29 está situado aguas arriba del terraplén y cerca del afluente del Aparral. El valor medio del pH en el piezómetro P29 es mayor que el de los piezómetros P24 y P25 en casi dos unidades.

La Fig. 10 (inferior) muestra la evolución temporal de los niveles piezométricos y del pH en los piezómetros P30, P32 y P33 situados en un área de descanso de la autovía AG-64 próxima al terraplén del Aparral y afectados también por el drenaje de aguas ácidas. Al igual que en otros piezómetros, los niveles piezométricos en estos piezómetros varían a lo largo del año, siendo los mínimos en verano y comienzo del otoño y los máximos en invierno. Los hidrogramas de los piezómetros P30 y P32 son similares. Las fluctuaciones del nivel son iguales a 7.2 m en el P30, 5 m en el P32 y 7.09 m en el P33.

Los datos de pH de los piezómetros P30, P32 y P33 son muy bajos a pesar de que estos piezómetros se encuentran alejados del terraplén y muestran tendencias temporales muy similares. Varían entre 2.25 y 3.63 en el P30, entre 2.67 y 4 en el P32 y entre 3.32 y 5.1 en el P33. Los valores medios en los piezómetros P30, P32 y P33 son iguales a 2.89, 3.37 y 4.13, respectivamente. Hay que destacar que la variación temporal del pH guarda una estrecha relación con la variación temporal de los niveles. En general, los valores de pH aumentan cuando suben los niveles. Posiblemente, el pH se recupera cuando se producen episodios de recarga. En general, el pH del agua de lluvia en Galicia oscila entre 5.5 y 7.0 (Vázquez et al. 2003) mientras que el pH de las aguas subterráneas en Galicia varía entre 5 y 6.

### 5.- Análisis de los flujos en el terraplén del Aparral

La construcción del terraplén alteró las condiciones de flujo de agua, la escorrentía superficial y los flujos subsuperficial y subterráneo. Se construyeron obras de drenaje transversal (ODT) mediante conducciones de hormigón para facilitar el tránsito de la escorrentía superficial tanto del arroyo del Aparral como de su afluente. En la actualidad, las aguas del arroyo del Aparral son conducidas mediante una tubería (bypass) hasta aguas abajo del terraplén para evitar su contacto con los rellenos del terraplén. Sin embargo, las aguas del afluente del Aparral no son evacuadas por la ODT.

Los posibles flujos de entrada de agua al terraplén incluyen: (1) Los flujos subterráneos desde el terreno natural en las zonas de las laderas del terreno natural cuando el nivel freático en el terreno sea mayor que el nivel freático en el relleno, (2) La escorrentía superficial y subsuperficial del afluente del Aparral, ya que el cauce de este afluente carece de continuidad con la ODT y por tanto el caudal de este afluente se infiltra en el terraplén, (3) La infiltración de agua desde la plataforma de la autovía, a través de las cunetas; y (4) La infiltración del agua por los taludes del terraplén, que posiblemente es poco importante ya que los taludes están impermeabilizados.

Los posibles flujos de salida de agua desde el terraplén incluyen: (1) Los flujos subterráneos desde el terraplén hacia el terreno natural en las laderas del terreno natural cuando el nivel freático en el relleno esté más alto que el nivel freático en el terreno, (2) El flujo de salida por la ODT del arroyo del Aparral ya que la ODT recoge aguas

procedentes del terraplén, como lo atestigua la salida de agua por dicho tubo incluso después del bypass del arroyo, (3) El flujo subterráneo de salida por la capa de material de saneo; y (4) Los rezumes en los taludes y en el pie del terraplén.

El análisis de los datos de pH de los piezómetros P24 y P25, con variaciones entre 2.42 y 2.5 en el primero y entre 2.27 y 3.02 en el segundo, indican que posiblemente exista un flujo de aguas ácidas desde el propio terraplén hacia aguas arriba del terraplén.



**Fig. 10.** Evolución temporal de los niveles piezométricos y del pH en los piezómetros P3 y P5 situados en zonas no afectadas por los drenajes ácidos (figura superior), los piezómetros P24, P25 y P29 situados en el terraplén del Aparral (figura intermedia) y los piezómetros P30, P32 y P33 situados en el área de descanso.

## 6. Conclusiones y trabajos futuros

Se han analizado los posibles términos fuente y flujos de agua causantes de las aguas ácidas del terraplén de Aparral. Estos flujos incluyen el drenaje del propio terraplén y la interacción de las aguas superficiales y subterráneas con los rellenos del terraplén que contienen materiales piríticos. Se han aplicado modelos hidrológicos de balance para cuantificar las componentes del balance hídrico en la cuenca vertiente al terraplén. También se han realizado campañas de geofísica y se ha realizado el seguimiento del nivel y del pH en una red de piezómetros.

Está previsto complementar la información mediante la perforación de varios piezómetros situados aguas arriba, aguas abajo y dentro del propio terraplén del Aparral en la plataforma de la autovía. Los sondeos se realizarán con recuperación de testigos para caracterizar la columna litológica y estudiar la composición geoquímica de los rellenos. Se realizarán análisis de la composición geoquímica de los materiales generadores de acidez, análisis mineralógicos y ensayos de lixiviación. También está previsto realizar modelos de flujo subterráneo y de transporte reactivo del terraplén del Aparral.

*Agradecimientos.* Este trabajo se ha realizado en el marco de un Proyecto financiado por la Agencia Gallega de Infraestructuras. Se ha contado además con fondos de la Universidad de A Coruña, de un Proyecto RETO del Ministerio de Economía y Competitividad (Proyecto CGL2016—78281-R) y de un Proyecto de la Xunta de Galicia para Grupos de Referencia Competitivos, ED431C 2017/67, del Programa de “Consolidación e estructuración de unidades de investigación competitivas”;

## 5.- Bibliografía

- Alvares D. y J. Samper, 2009. Evaluación de los recursos hídricos de la cuenca hidrográfica del Ebro mediante GISBALAN, En: IX Jornadas de Zona no Saturada, ZNS'09, Barcelona. Vol IX. 491-498.
- Alvares D., J. Samper y MA García Vera, 2009. Evaluación del efecto del cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca hidrográfica del Ebro mediante modelos hidrológicos, En: IX Jornadas de Zona no Saturada, ZNS'09, Barcelona 499-506.
- Clemmens, A., Bos, M.G., Replogle, J. 1984. Portable RBC Flumes for Furrows and Earthen Channels. Trans. ASAE 27, 1016-1021.
- Dahlin, T. y Loke, M. 2015. Negative apparent chargeability in time-domain induced polarisation data. *J. Appl. Geophys.* 123, 322-332
- Department of Environmental Protection 2005. *Field sampling procedures manual*. New Jersey State
- Espinha Marques J, J. Samper, B. Pisani, D. Alvares, J. M. Carvalho, H. I. Chaminé, J. M. Marques, F. Sodr  Borges, 2009. Assessment of water resources in a mountain environment with a semi-distributed hydrological model: Serra da Estrela case, central Portugal, En: IX Jornadas de Zona no Saturada, Barcelona Vol IX. pp 514-521.
- Espinha Marques, J., J. Samper, B. Pisani, D. Alvares, J.M. Carvalho, H.I. Chamin , J.M. Marques, G.T. Vieira, C. Mora y F. Sodr  Borges, 2010. Evaluation of water resources in a high-mountain basin in Serra da Estrela, Central Portugal, using a semi-distributed hydrological model. *Environ. Earth Sci.* 62:6, 1219-1234.
- Gonzales Amaya, A., T. Dahlin, G. Barmen, J-E. Rosberg, 2006. Electrical Resistivity Tomography and Induced Polarization for Mapping the Subsurface of Alluvial Fans: A Case Study in Punata (Bolivia). *Geosciences* 6(4), 51.
- Hammarsstrom, J., Brady, K., Cravotta, C. 2005. *Acid-rock drainage at Skytop, Centre County, Pennsylvania, 2004*. USGS Open-File Report 2005-1148.
- Macías-García, I, Pérez-Alberti, A., Martínez Cortizas, A, Nieto, C, Otero, X. 2007. 11 Millones de años de ciclos de biostaxia, resistaxia en la cuenca oligoceno-miocénica de As Pontes en Galicia.. *Edafologia*,(1-3), 67-78.
- Monterroso, C. 1995. Caracterización de los procesos edafogeoqu micos en una escombrera de estériles de lignito en proceso de restauración ambiental. Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Moriari, D.N., J.G. Arnold, M.W. Van Liew, R.L. Bingner, R.D. Harmel, T.L. Veith, 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Trans. ASABE 50, 885-900.
- Nordstrom D.K., Alpers, C.N. 1999. Geochemistry of acid mine waters. In Plumlee GS, Logsdon MJ, editors. The environmental geochemistry of mineral deposits. Reviews in Economic Geology. Littleton, CO. USA. 133-156.
- Orndorff, Z y Daniels, W. 2004. Evaluation of acid-producing sulfidic materials in Virginia highway corridors. *Environ. Geol.* 46, 209-216.
- Pisani, B, J Samper, L Ribeiro, Y Fakir, y T Stigter, 2011, Evaluación de los impactos del cambio climático en el acuífero de la Plana de la Galera. En: Jornadas de Zona no Saturada Vol X ZNS 2011, José Martínez y Nilda Sánchez Ed, 353-358
- Pisani, B, J Samper y MA García-Vera, 2013, Evaluación de los impactos del cambio climático en los recursos y en las demandas agrarias de la cuenca del río Jalón. En: XI Jornadas de La Zona no Saturada, Lugo, 6-8 Noviembre, 219-226
- Pisani, B., J Samper y A Paz, 2017, Modelos hidrológicos de balance de agua y evaluación de los impactos del cambio climático en zonas rurales de Galicia con eucaliptos, En: Estudios de la Zona no Saturada Vol XIII, Zaragoza, 8-10 noviembre. 565-576.
- Raposo, J., Molinero, J., Dafonte, J. 2010. Quantitative evaluation of hydrogeological impact produced by tunnel construction using water balance models. *Eng. Geol.* 116, 323-332.
- Ritter, A y R. Muñoz-Carpena, 2013, Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments, *J of Hydrol.* 480: 33-45.
- Roads and Traffic Authority NSW. 2005. *Guidelines for the Management of Acid Sulfate Materials: Acid Sulfate Soils, Acid Sulfate Rock and Monosulfidic Black Ooze*. Environment Branch. Road and Traffic Authority. New South Wales. Australia. <https://www.rms.nsw.gov.au/business-industry/partners-suppliers/documents/guides-manuals/guidelines-management-acid-sulfate-materials.pdf>. [consulta: 9 mayo 2019]
- Samper J, Ll. Hugu t, M.A. García Vera y J. Ares, 1999. Manual del usuario del programa VISUAL BALAN V.1.0: Código interactivo para la realizaci n de balances hidrológicos y la estimación de la recarga. Publicación T cnica de ENRESA n  5/99. Madrid. 205 pp.
- Samper, J., S. Moreira, D. Alvares, L. Montenegro, C. Lu, C. López, M. Bonilla, H. Ma, Y. Li, B. Pisani, F. Arechaga, A. Gil, J.A. Menéndez, T. Lucas, R. Valle-García, 2008a. Coupled hydrological and chemical model of coal mine dumps at As Pontes, A Coruña (Spain). Mine Water and the Environment. Proceedings of the 10th International Mine Water Association Congress, Karlovy Vary, Republica Checa, 2-5 June 2008. Ed. Rapantova, N. & Hrkal, Z., 403-406.
- Samper, J., S. Moreira, D. Alvares, L. Montenegro, C. Lu, C. López, M. Bonilla, H. Ma, Y. Li, B. Pisani, F. Arechaga, A. Gil, J.A. Menéndez, T. Lucas, R. Valle-García, 2008b. Model predictions of water chemistry for the future pit lake in As Pontes, A Coruña (Spain). Mine Water and the Environment. Proceedings of the 10th International Mine Water Association Congress, Karlovy Vary, Republica Checa, 2-5 June 2008. Ed. Rapantova, N. & Hrkal, Z., 607-610.
- Samper, J., B. Pisani y J. Espinha-Marques, 2011a. Estudio del flujo hipodérmico en zonas de montaña. Actas de las X Jornadas de Estudios en la Zona No Saturada, ZNS'11. Salamanca. Pp. 365-370.
- Samper, J, Y Li, B Pisani, L Ribeiro, Y Fakir, y T Stigter 2011b, Evaluación de los impactos del cambio climático en los acuíferos de la Plana de La Galera y del aluvial de Tortosa. En: Jornadas de Zona no Saturada Vol X ZNS 2011, José Martínez y Nilda Sánchez Ed, 359-364.
- Samper, J., B. Pisani y J. Espinha-Marques, 2015. Hydrological models of interflow in three Iberian mountain basins. *Environ. Earth Sci.* 73, 2645-2656.
- Vázquez, A., M. Costoya, R.M. Peña, S. García, C. Herrero, 2003. A rainwater quality monitoring network: a preliminary study of the composition of rainwater in Galicia (NW Spain). *Chemosphere* 51, 375-386.
- Yuval, D. y Oldenburg, D. 1996. DC resistivity and IP methods in acid mine drainage problems: Results from the Copper Cliff mine tailings impoundments. *J. Appl. Geophys.* 34, 187-198.