



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

**Escuela de
Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo**

Máster en Ingeniería de Minas



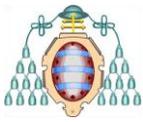
Trabajo Fin de Máster

**Identificación de los procesos hidrológicos que controlan
la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un
suelo contaminado**

Autor: Jorge Zapico Álvarez

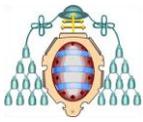
Tutora: María Beatriz González Fernández

Oviedo, junio de 2017



ÍNDICE

1. RESUMEN - ABSTRACT	2
2. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	2
3. ANTECEDENTES	4
4. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO: SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y CLIMATOLOGÍA	7
5. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	10
6. MARCO GEOLÓGICO	10
6.1. ESTRATIGRAFÍA	11
6.2. TECTÓNICA.....	13
7. CARACTERIZACIÓN DE SUELOS Y RELLENO ANTRÓPICO	15
8. HIDROLOGÍA	16
8.1. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL	16
8.2. HIDROGEOLOGÍA	17
9. TÉCNICAS DE CONTROL Y ATENUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN	54
10. CONCLUSIONES	59
11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
12. ANEXOS.....	61



1. RESUMEN - ABSTRACT

Las instalaciones del antiguo complejo de Nitrastur (Langreo) forman uno de los espacios más conocidos en Asturias de los degradados por el desarrollo de actividades mineras o industriales que han sido abandonados sin ningún tipo de restauración. Esto ha dado lugar a la existencia de un ambiente contaminante por la gran cantidad de residuos industriales que en su momento se usaron como relleno del terreno.

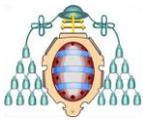
El recinto de Nitrastur se sitúa sobre un acuífero aluvial conectado con el río Nalón, y la lixiviación de metales pesados, entre los que destaca el arsénico, contenidos en el suelo representa un desastre ecológico de afección geográfica incierta. En este trabajo se establece el funcionamiento hidrodinámico del sistema acuífero y se estudia la calidad del agua y los procesos hidrológicos que la controlan. Además, se describe y analiza la inyección de nanopartículas de óxido de hierro como método de control de la contaminación.

The facilities of the old Nitrastur complex (Langreo) form one of the most well-known sites in Asturias of those degraded by the development of mining or industrial activities that have been abandoned without any restoration. This has led to the existence of a polluting environment due to the large amount of industrial waste that was once used as filling material.

The Nitrastur enclosure is located on an alluvial aquifer connected to the Nalón River, and the leaching of heavy metals, including arsenic, contained in the soil represents an ecological disaster of uncertain geographic location. This work establishes the hydrodynamic functioning of the aquifer system and studies the water quality and the hydrological processes that control it. In addition, it describes and analyzes the injection of iron oxide nanoparticles as a method of pollution control.

2. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En el concejo asturiano de Langreo, situado entre los distritos urbanos de Barros y La Felguera, se encuentra el antiguo complejo industrial de la Factoría de Nitrastur, tratándose de uno de los complejos industriales abandonados más grandes del Estado, con una



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



extensión de unos 200.000 metros cuadrados.

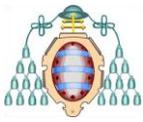
El origen de estas instalaciones se remonta a 1923, con la creación una fábrica química de amoníaco sintético y sulfatos junto a las instalaciones de la Fábrica de La Felguera (Duro Felguera) para aprovechar los residuos de los hornos de coque. Tras el parón de la actividad durante la Guerra Civil, al calor del Plan del Nitrógeno en la década de 1940 (que favorecía la producción nacional y la mayor necesidad de producción agroalimentaria y uso de abonos químicos) se llevó a cabo la ampliación de las instalaciones, con una nueva zona de expansión.

En 1950 comienza la construcción de lo que sería el actual complejo abandonado, bajo el nombre de Sociedad Ibérica del Nitrógeno (más tarde, Nitratos Asturianos (Nitrastur)). En el año 1977 se produce el cierre definitivo de la fábrica, ya en manos desde pocos años antes de la compañía Explosivos Río Tinto.

En la actualidad aún se conservan numerosos edificios, parcialmente derruidos, como se puede observar en la Figura 1, y entre los que destacan la torre de refrigeración, varios almacenes de grandes dimensiones, el lavadero, viviendas para los empleados, etc. Como problema principal, se presenta que los terrenos están conformados por un alto volumen de residuos y escorias a modo de rellenos antrópicos, procedentes de la propia fábrica o de industrias cercanas, que contienen altas concentraciones de metales pesados.



Figura 1.- Situación actual de abandono de las instalaciones. lne.es



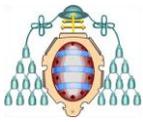
La gran cantidad de material contaminante que se encuentra en las instalaciones no implica únicamente afección al propio suelo, sino que la lixiviación de las sustancias presentes es una potencial fuente de contaminación de las aguas. El terreno natural, subyacente a los rellenos antrópicos, está constituido por un cuaternario aluvionar formado por limos, arenas y cantos rodados de cuarcita, tratándose de un acuífero de alta permeabilidad, conectado directamente con el río Nalón, que descansa sobre un impermeable constituido por las formaciones carboníferas.

La presencia de un acuífero aluvial bajo el suelo contaminado y la conexión de este con uno de los principales ríos asturianos (tanto en cuanto a longitud como a caudal) suponen una circunstancia que es a priori enormemente favorable a la movilidad y dispersión de las sustancias contaminantes y la consiguiente afección a grandes masas de agua. En base a esto, es preciso el estudio de los procesos hidrológicos que controlan la contaminación del acuífero aluvial de cara a implementar soluciones de retención y atenuación de los contaminantes, por lo que son objetivos de este trabajo:

- Describir la geología de la zona de estudio, con especial énfasis en el punto de vista hidrológico.
- Describir el funcionamiento hidrodinámico del acuífero aluvial.
- Determinar los parámetros hidrogeológicos del aluvial y del relleno antrópico.
- Analizar la calidad de las aguas subterráneas, estableciendo su relación principalmente con los niveles de precipitación.
- Describir la inyección de nanopartículas como método de control de la contaminación y establecer una primera valoración de su eficacia.

3. ANTECEDENTES

Tan solo en los últimos diez años son numerosos los estudios y proyectos que se han realizado en relación con el aluvial del río Nalón en la zona del complejo industrial de Nitrastur o directamente sobre la contaminación de suelos y aguas subterráneas en las propias instalaciones.



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado

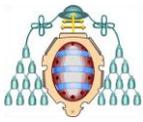


Debido a las obras del soterramiento de las vías de FEVE en Langreo se elaboró en el año 2008 una caracterización hidrogeológica del aluvial y análisis de las influencia de dichas obras en el mismo (INGE, 2008).

Posteriormente, a encargo del Servicio de Gestión Ambiental de la Dirección General del Agua y Calidad Ambiental, se instaló una red piezométrica y se realizaron ensayos de tratamiento de suelos en la parcela que contiene las instalaciones de Nitrastur, con el fin de reconocer la estructura y litología de los suelos de la parcela, determinar los niveles de contaminación presentes en suelos y aguas subterráneas y facilitar el seguimiento de la calidad de las aguas subterráneas (DEC, 2009). Las principales conclusiones que se extraen de este proyecto son las siguientes:

- Se observaron concentraciones de metales superiores o muy superiores a los niveles genéricos de referencia establecidos (NGR), principalmente de arsénico, plomo, mercurio y cobre, aunque también otros metales como zinc, cadmio y bario presentaron en muestras puntuales valores por encima de los NGR utilizados.
- En zonas acotadas y de menor extensión (vinculadas a la zona de las antiguas calderas) se localizaron suelos contaminados por hidrocarburos (TPH), llegando a observarse incluso fases libres sobre el nivel freático.
- El flujo de las aguas subterráneas presenta una dirección hacia el río Nalón, lo que supone un problema en cuanto a la dispersión horizontal de los contaminantes.
- Los ensayos de tratabilidad realizados al suelo contaminado ponen de manifiesto la inviabilidad de obtener resultados mediante técnicas de lavado de suelos pero suponen un aval en cuanto al uso de técnicas de inertización.

La Universidad de Oviedo también ha venido trabajando de forma continuada en lo relativo a la contaminación de suelos y aguas en los terrenos del complejo industrial abandonado, principalmente en el marco del proyecto europeo de la convocatoria LIFE+ “Innovative and Demonstrative Arsenic Remediation Thecnologies for Soils” (I+DARTS), LIFE11/ENV/ES/000547, activo entre los años 2012 y 2016. Este proyecto tiene por objetivo principal el desarrollo de un protocolo para la recuperación de suelos contaminados con arsénico y metales pesados, producto de actividades mineras o



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



industriales. En el Principado de Asturias, además de en el complejo industrial de Nitrastur, se aplicaron diferentes técnicas de remediación en la antigua mina de mercurio de El Terronal, ubicada en Mieres, así como en la mina abandonada de mercurio de Olicio (Cangas de Onís). Las tres estrategias básicas de recuperación de un terreno contaminado son el transporte del mismo a vertedero, el confinamiento del suelo afectado o la eliminación de los contaminantes mediante tecnologías físico-químicas o biológicas; en el proyecto LIFE I+DARTS sólo se considera esta última posibilidad, por ser el vertido o el confinamiento opciones anticuadas, poco sostenibles y caras, y en el caso de los terrenos de Nitrastur se llevaron a cabo ensayos de las siguientes técnicas:

- Fitorremediación, tecnología basada en la capacidad de algunas plantas para tolerar, absorber, acumular y degradar compuestos contaminantes acumulados en el suelo (Figura 2).

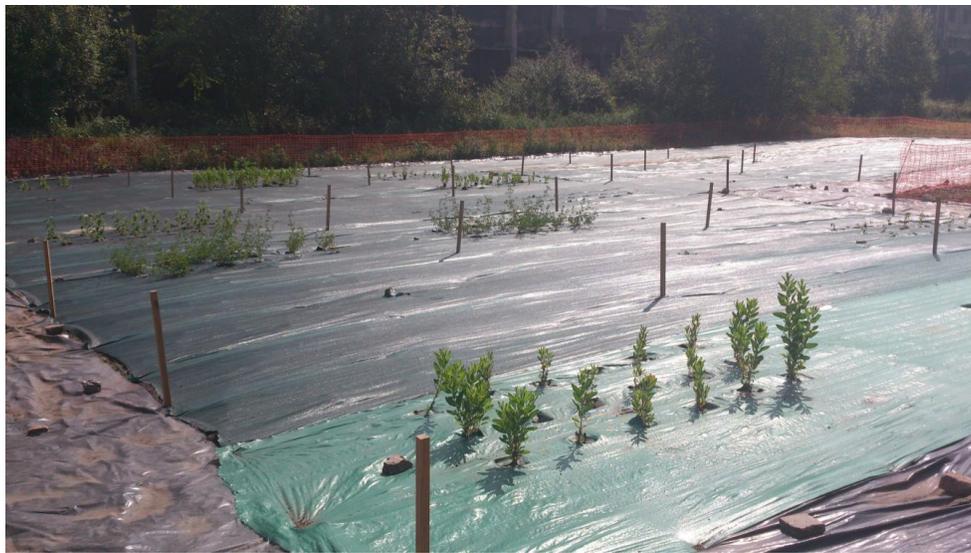
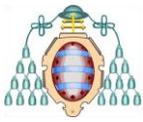


Figura 2.- Ensayos de fitorremediación en los terrenos de Nitrastur. LIFE I+DARTS.

- Biorremediación, que utiliza el potencial de algunos microorganismos para inmovilizar, detoxificar o incluso degradar los contaminantes que afectan a un suelo.
- Recuperación electrocinética, consistente en la aplicación de una corriente eléctrica de baja intensidad entre dos electrodos introducidos en la zona contaminada, para provocar la migración de las especies con carga y su acumulación en un volumen de terreno pequeño que luego puede ser retirado.



- Lavado de suelos, en el que se emplean técnicas de separación física que aprovechan propiedades de los contaminantes (granulometría, densidad, magnetismo, etc.) sin el uso de aditivos químicos.

4. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO: SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y CLIMATOLOGÍA

La zona de estudio se encuentra situada en la llanura aluvial del río Nalón, en el margen derecho de éste, y entre los distritos urbanos de Barros y La Felguera, ambos pertenecientes al concejo de Langreo (Figura 3), siendo una zona que se enmarca en la cuenca carbonífera central asturiana. Este emplazamiento se corresponde con la zona baja del valle del Nalón.

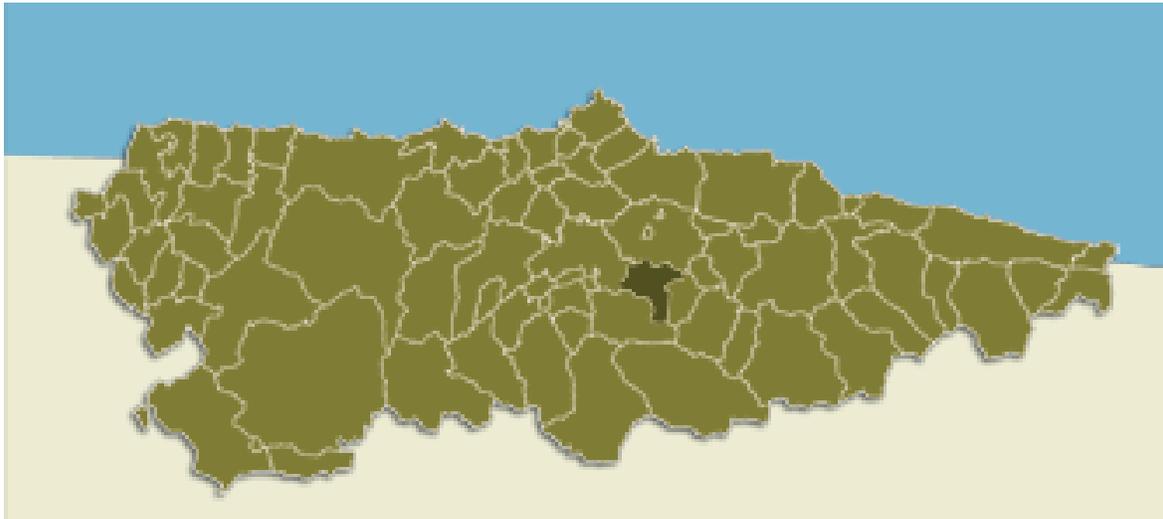


Figura 3. Ubicación del concejo de Langreo en el Principado de Asturias.

El Valle del Nalón es un valle largo, escarpado y estrecho, que se extiende desde el nacimiento del río que le da nombre, en el Puerto de Tarna, en la Cordillera Cantábrica, hasta la meseta central asturiana. El concejo de Langreo es el más poblado de los que lo componen, y el entorno está formado por el valle ocupado por las poblaciones principales (en las que se integran los usos industriales) y rodeado por pequeñas lomas.

Los terrenos de la fábrica de Nitrastur, objeto de estudio, dentro del ya comentado entorno urbano de Langreo, se encuentran delimitados por las instalaciones de la Central Térmica de Lada (pasando las vías del tren entre ambas parcelas) y por el tramo inicial de la histórica carretera Carbonera (AS-246), como puede apreciarse en la Figura 4.

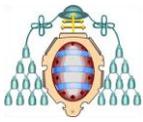
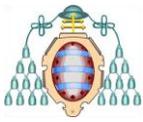


Figura 4.- Vista aérea de los terrenos de Nitrastrur.

En cuanto al clima asturiano, éste se cataloga como oceánico, con precipitaciones abundantes todo el año, añadidas a la elevada nubosidad, y con un régimen de vientos constante y suave y una radiación solar moderada. El relieve y sobre todo la influencia marítima son los principales condicionantes de esta climatología suave, de marcado carácter atlántico, aunque en las cumbres más altas se presenta un clima más extremo.

Las precipitaciones, que son percibidas como la principal característica del clima asturiano, están interrelacionadas con la altitud, y, en la zona que nos ocupa, se sitúan de media anual para un año hidrológico medio por encima de los 1000 mm, que se centran principalmente entre los meses de octubre y mayo, dando lugar a una lluvia útil superior a los 330 mm (Tabla 1).



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



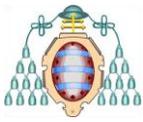
Por lo que respecta a las temperaturas, la media anual se sitúa sobre los 12 °C, siendo la media de las temperaturas del mes más frío de unos 8 °C y la media de las del mes más cálido de 18-19 °C, aunque estos valores no son extremos y pueden ser superados fácilmente durante heladas y días muy calurosos.

A falta de datos de una estación meteorológica más cercana, se puede disponer en la página web de aemet de los valores climatológicos de la estación termopluviométrica ubicada en la capital asturiana, y estimar en base a los mismos las características más concretas del interior asturiano. En la siguiente tabla se presentan los datos de temperaturas y precipitaciones medias (<http://www.aemet.es/>) durante el último cuarto del siglo XX, así como el cálculo de la lluvia útil y su distribución a lo largo del año:

Tabla 1.- Datos climatológicos en la Estación de Oviedo en el período 1972-2000.

Estación: OVIEDO						
Periodo: 1972-2000				Altitud: 336 m		
Latitud: 43°21'				Longitud: 5°52'		
MES	TEMP.(°C)	PREC. (mm)	EVAP. POT. (mm)	EVAP. REAL (mm)	DEF. (mm)	EXC. (mm)
Sept.	17,3	64	80,38	64,00	16,38	0,00
Oct.	14	98	55,62	55,62	0,00	0,00
Nov.	10,8	101	34,16	34,16	0,00	9,22
Dic.	9	96	25,91	25,91	0,00	70,09
Ene.	8	85	23,04	23,04	0,00	61,96
Feb.	8,8	85	26,43	26,43	0,00	58,57
Mar.	10	82	38,78	38,78	0,00	43,22
Abr.	10,6	109	45,52	45,52	0,00	63,48
May.	13,3	94	68,97	68,97	0,00	25,03
Jun.	16,1	53	89,32	89,32	0,00	0,00
Jul.	18,3	52	106,50	106,50	0,00	0,00
Ago.	18,7	55	101,86	64,18	37,67	0,00
AÑO	12,91	974,00	696,48	642,43	54,05	331,57
Lluvia útil en un año medio:			331,57			

Se puede observar cómo únicamente se presenta sequía en los meses de agosto y septiembre, mientras que prácticamente en la totalidad del resto de meses del año hay un exceso de precipitación frente a la evapotranspiración, que se traduce en una lluvia útil en un año medio superior a los 300 mm.

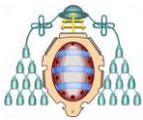


5. METODOLOGÍA DE TRABAJO

- 1) Partiendo de la información geológica de la que se dispone por medio del Mapa Geológico continuo 1:50.000 (GEODE), de la información de sondeos realizados en proyectos anteriores (DEC, 2009) y de los últimos sondeos perforados, en los que durante el presente trabajo se realizaron algunos ensayos, se ha definido la hidrostratigrafía de la zona de estudio. Se recurre a estos mismos sondeos para conocer la caracterización del relleno de origen antrópico que se encuentra en el antiguo complejo industrial.
- 2) La recopilación de datos de trabajos anteriores se centra en los siguientes temas:
 - Niveles piezométricos que abarquen la extensión de la parcela de Nitrastur y datos de precipitación y caudal del río Nalón para las fechas de medición.
 - Resultados de análisis hidroquímicos de las aguas subterráneas y de contenido en metales de las mismas.
- 3) El trabajo de campo que se desarrolla en el marco de este proyecto consiste en la participación en los ensayos de slug test, la toma de muestras para realizar ensayos de permeabilidad, así como la realización de dichos ensayos, la participación en la campaña de muestreo previa y posterior a la inyección de nanopartículas, y la realización de un ensayo de inundación controlada para evaluar la influencia de la precipitación en el contenido de metales en el agua subterránea.
- 4) Contando tanto con los datos recopilados como con los obtenidos mediante el trabajo de campo, se lleva a cabo un tratamiento de los mismos, estableciendo el funcionamiento hidrodinámico del acuífero y analizando la contaminación presente en el mismo y su relación con otros parámetros, haciendo por último una valoración de los primeros resultados del ensayo de inyección de nanopartículas.

6. MARCO GEOLÓGICO

La zona de estudio se encuentra situada en la Cuenca Carbonífera Central, que es una de las unidades en que está dividida la Zona Cantábrica (Julivert et al., 1972), la cual, a su vez, forma parte del denominado Macizo Ibérico (Figura 5).



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado

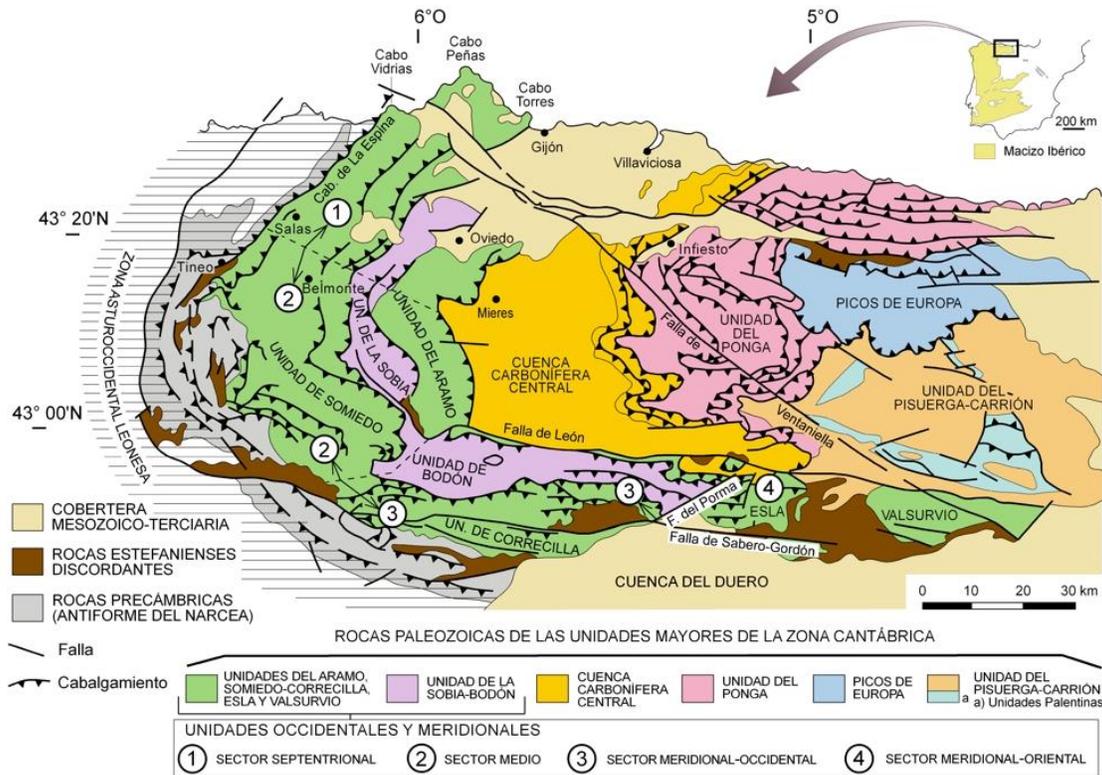


Figura 5.- Unidades geológicas de las zonas Cantábrica y Asturoccidental-leonesa. Vera J. A. (ed.) (2004).

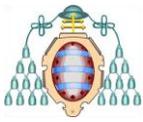
Esta unidad de la Zona Cantábrica es en la que mejor representados se encuentran los sedimentos carboníferos terrígenos, alcanzando un espesor próximo a los 6.000 m, y su edad abarca desde el Namuriense B al Westfaliense D (Fernández, L.P., 1995).

6.1. ESTRATIGRAFÍA

Los terrenos en los que se encuentra el complejo industrial de Nitrastur se sitúan sobre el material cuaternario correspondiente al aluvial del río Nalón el cual se dispone discordantemente sobre materiales del Carbonífero o del Cretácico, dependiendo de la zona.

El Carbonífero en el entorno de la zona estudiada está representado por:

- Formación Alba o caliza Griotte: Conjunto formado, de muro a techo, por calizas nodulosas rojas, radiolaritas, pizarras silíceas rojas, pizarras grises más arcillosas y calizas nodulosas verdes que pasan insensiblemente a calizas grises. Potencia entre 15 y 40 metros.
- Formaciones Barcaliente y Valdeteja (Caliza de Montaña): Concordante con el



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



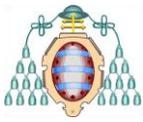
tramo anterior y compuesta en términos generales por calizas grises de grano fino, fértidas y bien estratificadas en la base, calizas y dolomías de aspecto masivo en la parte media, y calizas grises más claras, tableadas, con laminación paralela y de grano fino en la parte alta. Potencia media de 250-300 metros.

- Grupo Lena: Conjunto de unos 3500 m de espesor constituido por sedimentos marinos y deltaicos, fundamentalmente pizarras con intercalaciones de areniscas y algunas capas de carbón así como algunos niveles calcáreos (Caliza de Peñarredonda). El grupo está subdividido a su vez en varios paquetes (Fresnedo, Levinco, Llanón, Tendeyón y Caleras).
- Grupo Sama: Formado por pizarras, areniscas, conglomerados monomícticos, (silíceos, conocidos como pudingas) y polimícticos, (silíceos y calcáreos, también denominados gonfolitas), escasos niveles de caliza y abundantes capas de carbón. Son de origen mayoritariamente deltaico y alcanzan un espesor de unos 2000 m. Están agrupados también en paquetes (Generalas, San Antonio, María Luisa, Sotón, Entrerregueras, Sorriego, Modesta y Oscura).

Dependiendo de la zona, en unos casos sobre los materiales carboníferos se sitúan, de forma claramente discordante, las formaciones Sotres, Cabranes, Caravia y Fuentes de edad permotriásica; en otras zonas no existen materiales permotriásicos y sobre el carbonífero se disponen discordantemente las formaciones Pola de Siero o El Caleyú, del Cretácico.

Las formaciones permotriásicas, que suelen ser fácilmente reconocibles por sus tonalidades rojizas, están constituidas por lutitas, limolitas, areniscas, algún nivel de calizas, conglomerados y materiales vulcanoclásticos, éstos últimos en las formaciones Sotres y Cabranes. En la formación Caravia (situada por encima de la Fm. Cabranes) existe una importante mineralización de fluorita, explotada en diferentes puntos de la región; a techo de la Fm. Caravia se dispone la Fm. Fuentes cuya edad alcanza el Jurásico basal y en ella predominan las lutitas y limolitas.

Finalmente, los materiales del Cretácico están representados por las formaciones Pola de Siero y el Caleyú que, en la zona de estudio se encuentran en contacto debido a la presencia de una falla. La Fm. Pola de Siero, de edad Aptiense superior – Albiense está constituida por dos tramos, el inferior de conglomerados silíceos y el superior de areniscas, ambos con



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



intercalaciones de arcillas. La Fm. El Caleyú, de edad Albiense Superior – Cenomaniense, es un conjunto de areniscas de tonalidades blanquecinas con intercalaciones arcillosas; en ambas formaciones es frecuente la presencia de niveles de materia orgánica y ámbar.

Una descripción más detallada de los materiales que han sido objeto de estudio en este trabajo se muestra en la Figura 6, que corresponde a las columnas de dos sondeos perforados en los terrenos estudiados.

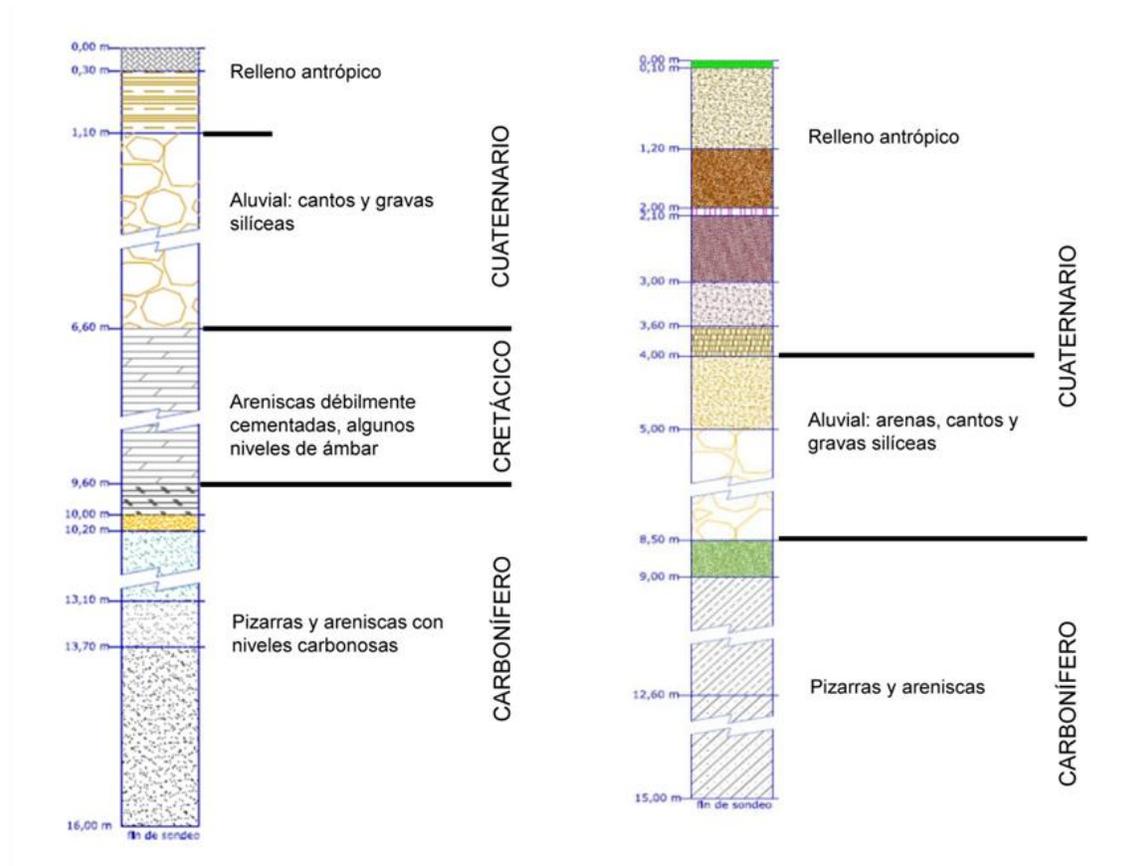
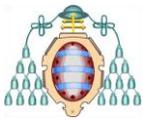


Figura 6.- Columnas de los sondeos S-02 y S-18. DEC (2009).

6.2. TECTÓNICA

Como se puede ver en la Figura 5, la Cuenca Carbonífera Central se encuentra en el núcleo de la “Rodilla Astúrica” y comprendida entre las unidades del Aramo, al oeste, y Ponga, al este. El emplazamiento de estas unidades, cuyos frentes de cabalgamiento tienen como dirección general la norte-sur, obedece a empujes que provienen del oeste, y que dieron lugar a la superposición de la Unidad del Aramo sobre la Cuenca Carbonífera Central, y de ésta sobre la Unidad del Ponga.



Dentro de la Cuenca Carbonífera Central, la parcela de Nitrastur está situada en la Unidad Oriental (o de Aller-Nalón) de la misma, que es la de mayores dimensiones de las dos en las que se divide (siendo la otra la Unidad Occidental o de Riosa-Olloniego). Esta unidad se dispone en forma de sinclinorio, reflejando la primitiva disposición en cubeta, posteriormente plegada. En la zona del río Nalón la dirección de los pliegues principales es la de NNE-SSO.

Como se observa en el mapa geológico (Figura 7), los materiales del entorno de la zona de estudio están afectados por diversos pliegues, y, además, la zona inmediata a los terrenos del antiguo complejo industrial está atravesada por una falla en dirección NO-SE que corta netamente al Cretácico, lo cual indica que aunque fuese anterior a esa edad, debió tener un importante rejuego posteriormente a la deposición del Mesozoico.

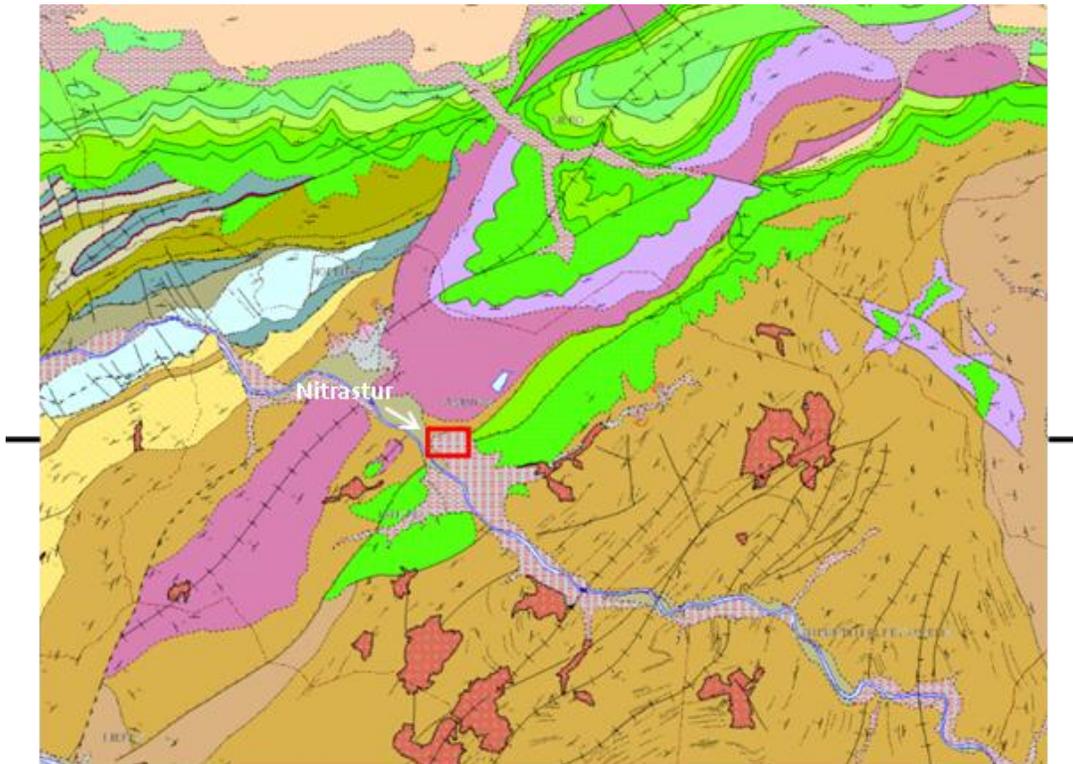
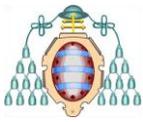


Figura 7.- Mapa geológico de la zona de estudio con indicación de la situación del corte Oeste-Este. (IGME: <http://info.igme.es/visor/>).

Para entender mejor la estructura de la zona, se presenta a continuación el corte geológico (Figura 8) indicado en la imagen anterior, que atraviesa en dirección O-E la zona de estudio, pudiendo observarse en el mismo como ésta se sitúa sobre el aluvial del Nalón, estando afectadas por una falla las formaciones subyacentes, lo que implica que al oeste de



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



la falla el aluvial descansa sobre terrenos carboníferos, mientras que en la parte oriental se presentan estratos de edad cretácica entre el aluvial y el carbonífero.

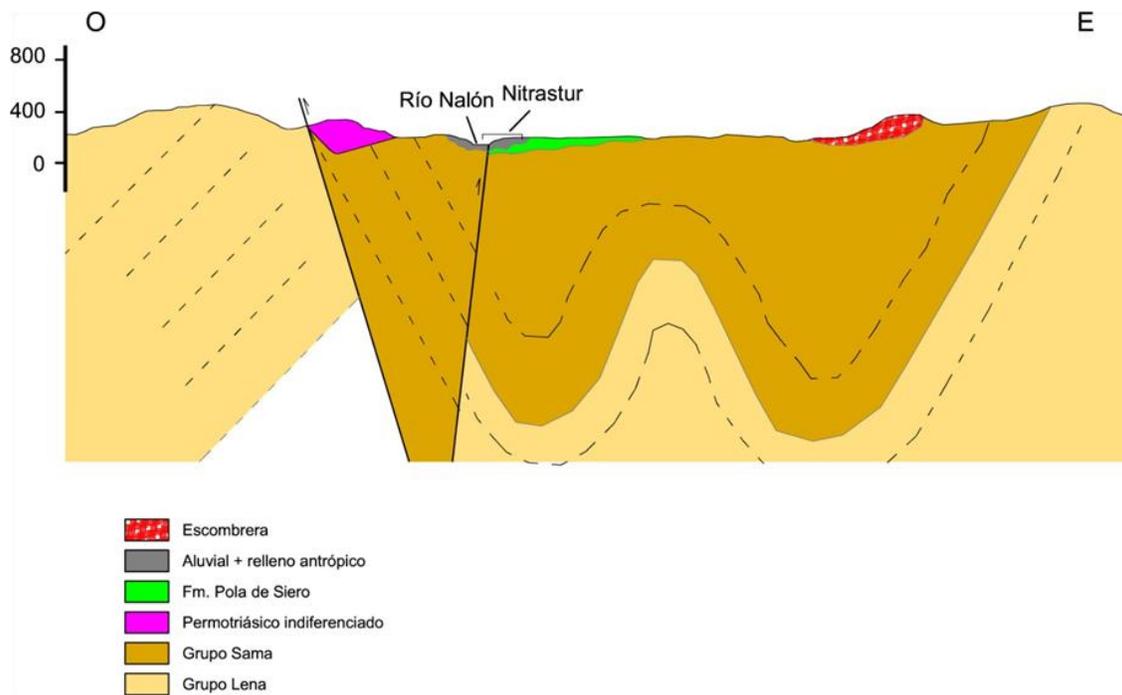
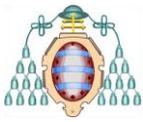


Figura 8.- Corte geológico del contexto local.

7. CARACTERIZACIÓN DE SUELOS Y RELLENO ANTRÓPICO

En proyectos anteriores en los que se han realizado calicatas y sondeos en la parcela de Nitrastur (DEC, 2009), se ha caracterizado el relleno antrópico de dicha zona de manera que puede hacerse mención varias áreas según el tipo de material y su origen:

- Relleno de escorias siderúrgicas, de color anaranjado, rojizo, gris o negro y que se localizan en la parte central de la franja oeste del complejo.
- Relleno de escombros de construcción (ladrillos, bloques, etc.), arenas y gravas, que se encuentran principalmente en la franja este de la parcela.
- Material carbonoso de color negro, principalmente en la zona sur de la parcela.
- Relleno de restos de pirita (inquemados o parcialmente quemados), de color rojizo-granate y que ocupa gran extensión en toda la parte central y sureste de los terrenos de Nitrastur.



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



Aunque los residuos anteriores se presentan a modo de relleno predominando cada tipo en distintas zonas, es frecuente que se presenten por toda la parcela mezclados o como capas intercaladas. En las zonas no construidas se presenta generalmente un pequeño espesor de terreno vegetal que cubre el relleno antrópico inferior, de entre 1,5 m y 2 m de espesor en las zonas norte y este, que va aumentando hasta los 4-4,5 m de las partes este y sureste.

De entre los materiales de relleno mencionados cabe destacar, por estar presentes en buena extensión y por su identificado carácter contaminante, las cenizas de piritas, que se pueden observar en la calicata de la Figura 9.

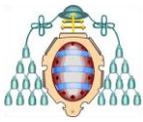


Figura 9.- Calicata realizada en la zona en la que predominan las cenizas de piritas como relleno. DEC, 2009.

8. HIDROLOGÍA

8.1. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL

El principal curso fluvial en la zona de estudio es el río Nalón, que discurre a poca distancia de los terrenos del complejo de Nitrastur, por lo que éstos se encuentran situados en el centro de la cuenca de dicho río. La cuenca hidrográfica que alimenta al Nalón tiene 3.692 Km², siendo la mayor de las que drenan el Principado de Asturias, y su Caudal medio anual es de 55,18 m³/seg., con mínimos estivales de 31,24 m³/seg. y máximos de 84,5 m³/seg, según datos de la Confederación Hidrográfica del Cantábrico (<https://www.chcantabrico.es>).



La subcuenca principal a destacar en las inmediaciones es la del Candín, ya que este río, aunque mediante encauzamiento subterráneo, discurre también en las proximidades a la zona de estudio, desembocando en el Nalón aguas abajo.

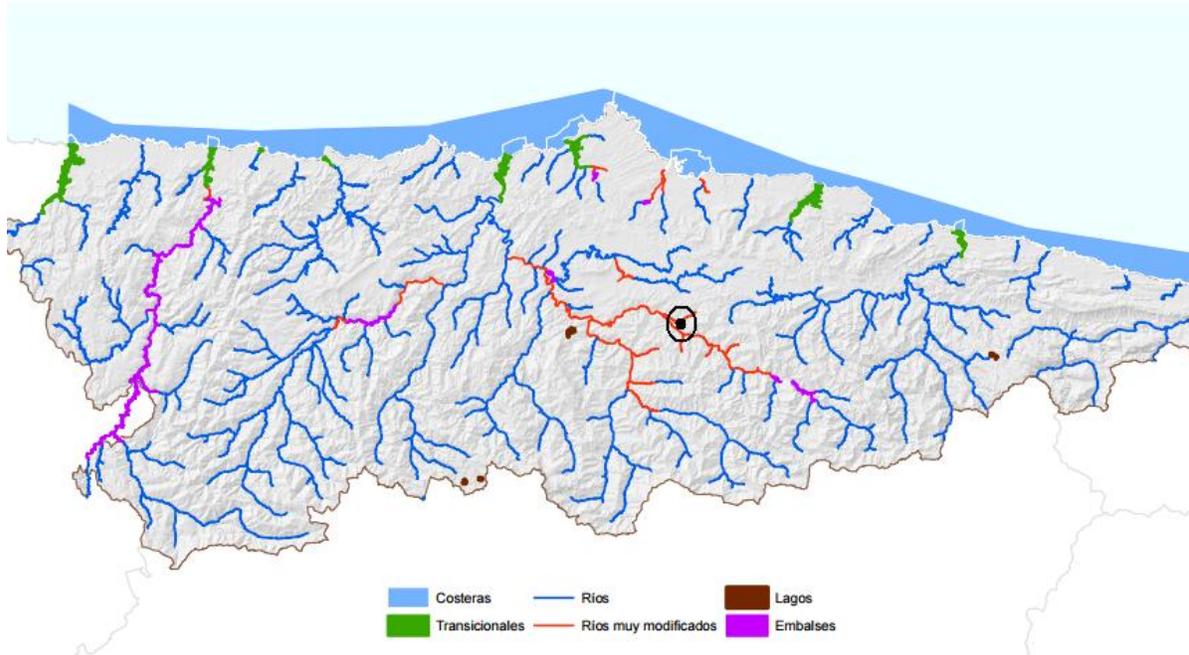


Figura 10.- Mapa de tipos de masas de agua en Asturias, con la zona de estudio señalada. <https://www.asturias.es>

Como se observa en el mapa (Figura 10), las instalaciones de Nitrastur se encuadran entre los cauces de los ríos Nalón y Candín, siendo el resto de cursos fluviales en la zona arroyos de poca importancia. Como masas de agua a destacar en la cuenca hidrográfica, aparte de los citados ríos, caben los embalses de Rioseco y Tanes, aguas arriba (en los concejos de Sobrescobio y Caso) y utilizados para la producción de energía eléctrica y abastecimiento de la zona central de Asturias. Aguas abajo, ya tras la incorporación al Nalón de diversos afluentes, como el río Caudal, se encuentra el embalse de El Furacón, destinado principalmente a la producción de energía eléctrica.

8.2. HIDROGEOLOGÍA

La Cuenca Carbonífera Asturiana, con una superficie de 859,6 km², está considerada en el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental (<https://www.chcantabrico.es>, Figura 11) como una masa de agua, si bien no se trata de una unidad acuífera homogénea ya que contiene tramos de permeabilidad muy diferente.

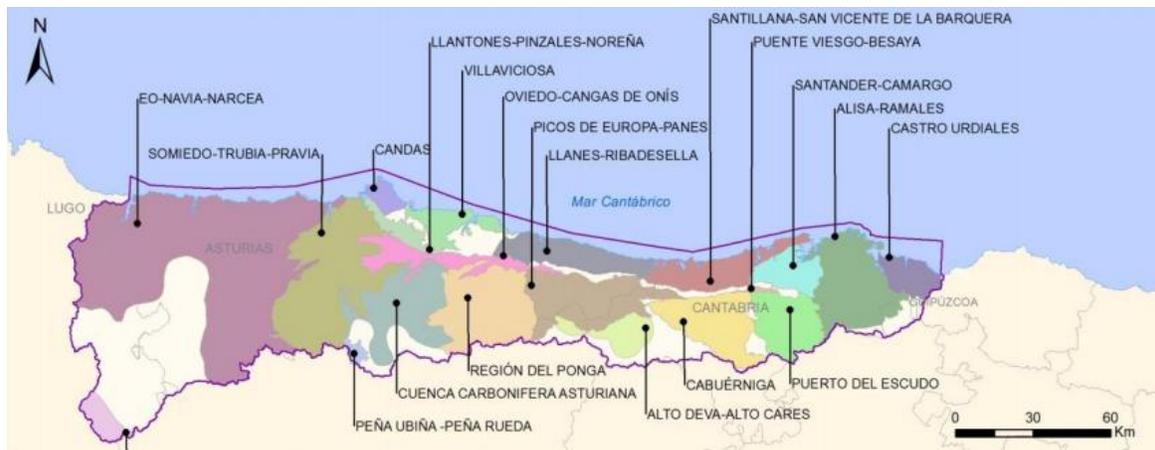
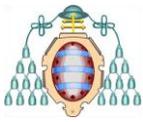


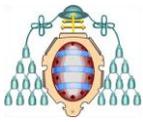
Figura 11.- Delimitación de las masas de agua subterránea. Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental (2015).

8.2.1. HIDROESTRATIGRAFÍA

En la Figura 12 se muestra la columna hidroestratigráfica en la que se representan los materiales de la zona de estudio desde el punto de vista hidrogeológico. Se pueden diferenciar varios tramos acuíferos conectados entre sí aunque por sus características litológicas presentarán diferentes permeabilidades.

De muro a techo se encuentran los siguientes materiales:

- Acuícludo: corresponde al Grupo Sama del Carbonífero el cual, por estar constituido mayoritariamente por pizarras, presentará una permeabilidad muy baja.
- Acuífero cretácico: constituido por arenas con intercalaciones arcillosas y en algunas zonas también por conglomerados. Este nivel se encuentra discordante sobre el Carbonífero y no siempre aparece.
- Acuífero cuaternario aluvial: formado por limos, arenas y cantos rodados de cuarcita, tratándose por tanto de un acuífero de alta permeabilidad conectado directamente con el curso fluvial.
- Acuífero cuaternario antrópico: formado por escorias, cenizas de pirita, arcillas y otros materiales de relleno.



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado

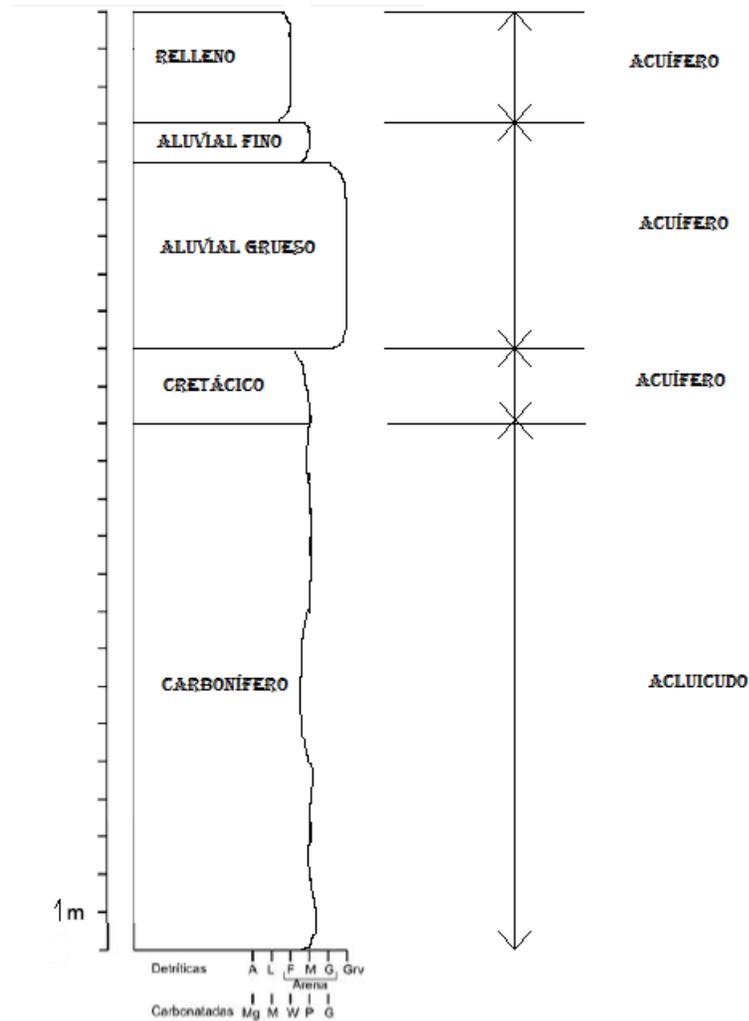
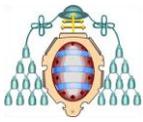


Figura 12.- Esquema general de columna hidroestratigráfica.

8.2.2. FUNCIONAMIENTO HIDRODINÁMICO

Los materiales objeto de estudio constituyen un acuífero libre que, como tal, contará con el agua de lluvia como fuente de recarga principal. Para poder comprender el funcionamiento hidrodinámico del acuífero no basta la presunción de recarga mediante el aporte de la precipitación y la descarga al cauce fluvial, sino que cabe el estudio del sentido del flujo, determinando de tal forma si se trata de un acuífero que aporta agua a un río ganador o si por el contrario se recarga gracias al cauce fluvial en alguna época (o durante todo el año).

Para conocer la aportación de agua subterránea al río y viceversa es indispensable determinar el tipo de conexión hidráulica que hay entre ambos. Esta conexión vendrá controlada por diversos factores: el tipo de acuífero, su situación respecto al cauce del río y la situación relativa de los niveles del río y de los niveles piezométricos del acuífero en la



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



zona contigua al río. Estos factores determinarán cuando un río es ganador (aumenta su caudal por aportaciones subterráneas) o perdedor respecto al acuífero (recarga al acuífero y por lo tanto su caudal disminuye a lo largo del río). La representación de de la relación entre un río con un acuífero según la dirección del flujo de agua se presenta en las Figuras 13 y 14.

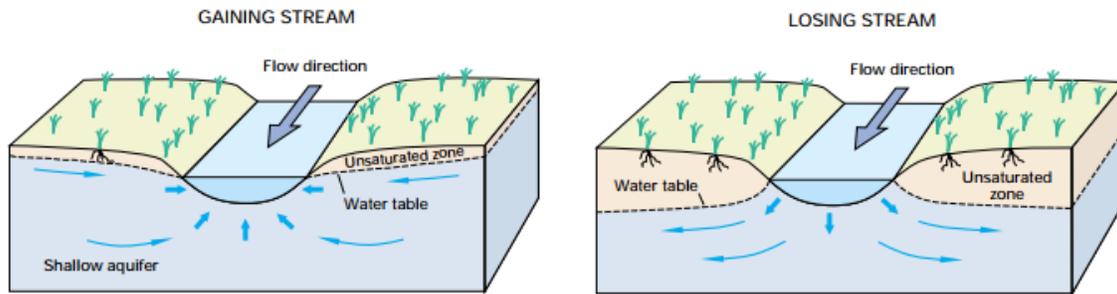


Figura 13.- Representación de un río ganador y perdedor conectado con el acuífero. Winter et al. (1998)

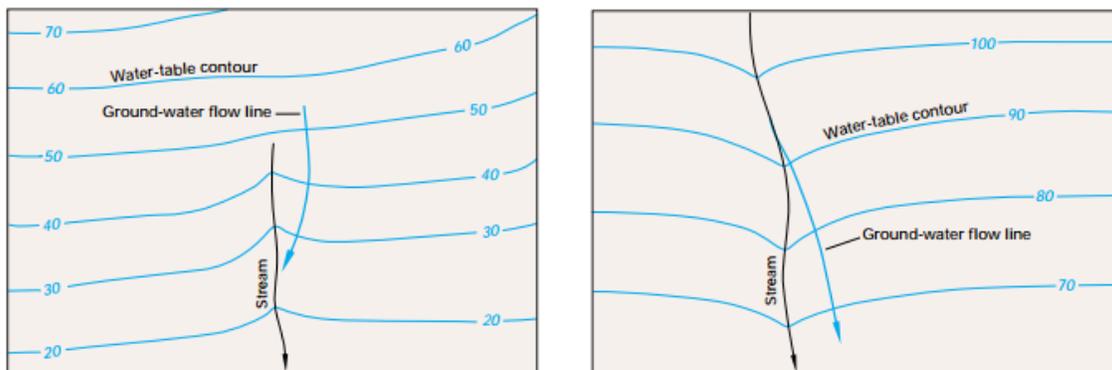
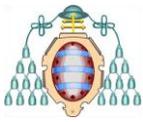


Figura 14.- Posición de las isopiezas frente a un río ganador (izquierda) y frente a un río perdedor (derecha). Winter et al. (1998)

La relación río-acuífero no sólo es variable a lo largo del curso del río sino que también, en muchos casos, puede presentar variaciones a lo largo del año. En este caso, en los periodos húmedos y épocas de crecida del río, el curso de agua superficial probablemente presente un nivel de lámina de agua superior al del acuífero y proceda a la recarga del mismo, mientras que en los periodos más secos en los que el río fluye con poco caudal, probablemente la mayor parte de éste sea aportado desde el acuífero.

Para establecer el sentido del flujo del acuífero en la zona de estudio se dispone de las medidas del nivel freático en 13 sondeos distribuidos en la parcela de Nitrastur (Figura 15) y espaciadas en el tiempo entre octubre de 2015 y abril de 2016.



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado

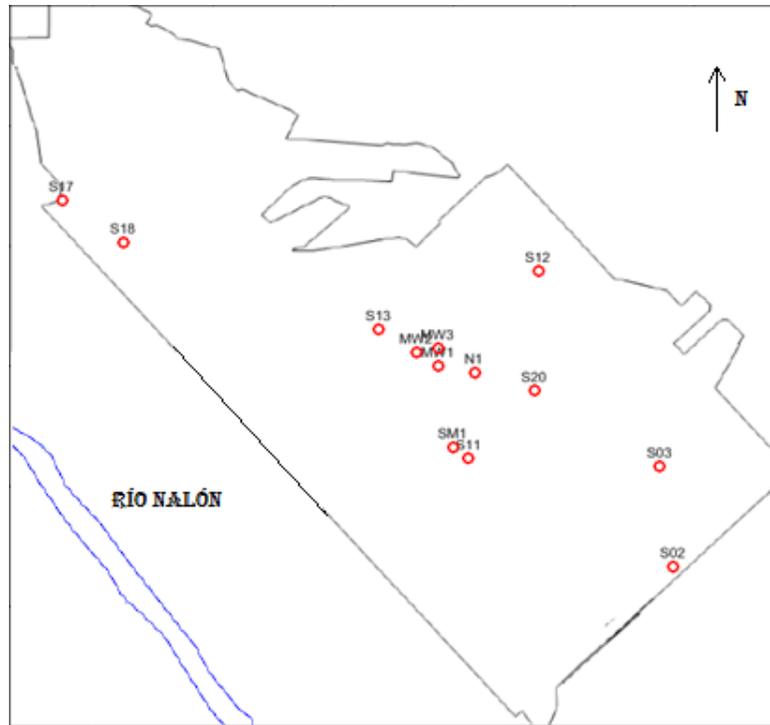
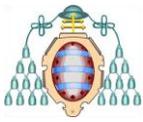


Figura 15.- Distribución de los sondeos en la parcela de Nitrastur.

Con los datos de precipitación y de niveles freáticos medidos a lo largo del periodo comprendido entre Julio de 2015 y Abril de 2016 se han elaborado mapas de isopiezas para determinar el sentido del flujo, la relación del acuífero con el río, y las variaciones a lo largo del año. La Tabla 2 contiene los niveles freáticos medidos en las fechas seleccionadas.

Tabla 2.- Niveles freáticos (msnm) medidos en los sondeos en tres fechas concretas.

Sondeo	20/07/2015	22/12/2015	06/04/2016
MW1	195,028	195,278	195,698
MW2	194,961	195,191	195,611
MW3	194,949	195,209	195,659
N1	195,179	195,419	195,879
S02	195,913	196,093	196,333
S03	195,574	195,724	195,934
S11	195,276	195,496	195,916
S12	195,047	195,277	195,507
S13	194,669	194,879	195,159
S17	193,202	193,332	193,902
S18	193,38	193,6	193,98
S20	195,246	195,476	195,886
SM1	195,23	195,44	195,83



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



Con los datos anteriores se elaboran los siguientes mapas de isopiezas y dirección de flujo (Figuras 16, 17 y 18):

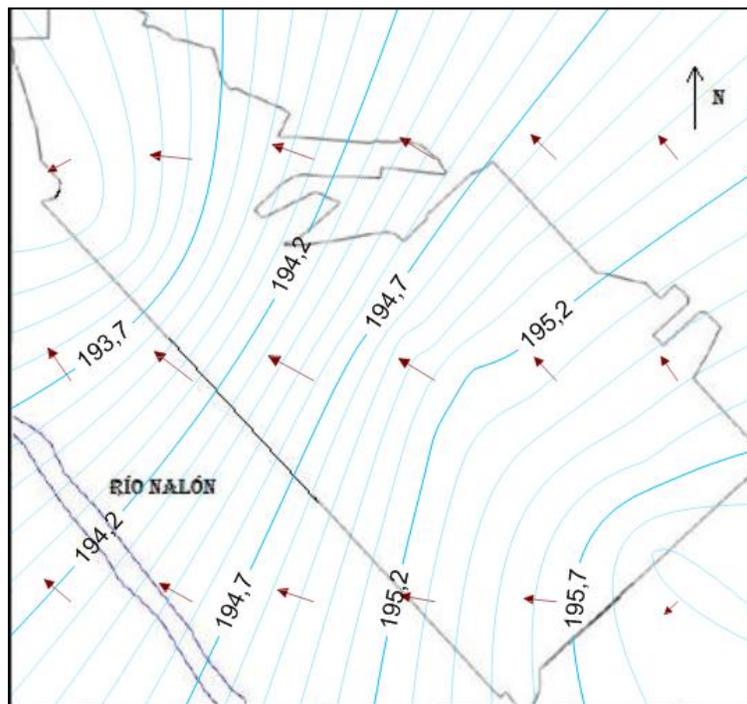


Figura 16.- Mapa de isopiezas y dirección de flujo a 20/07/2015.

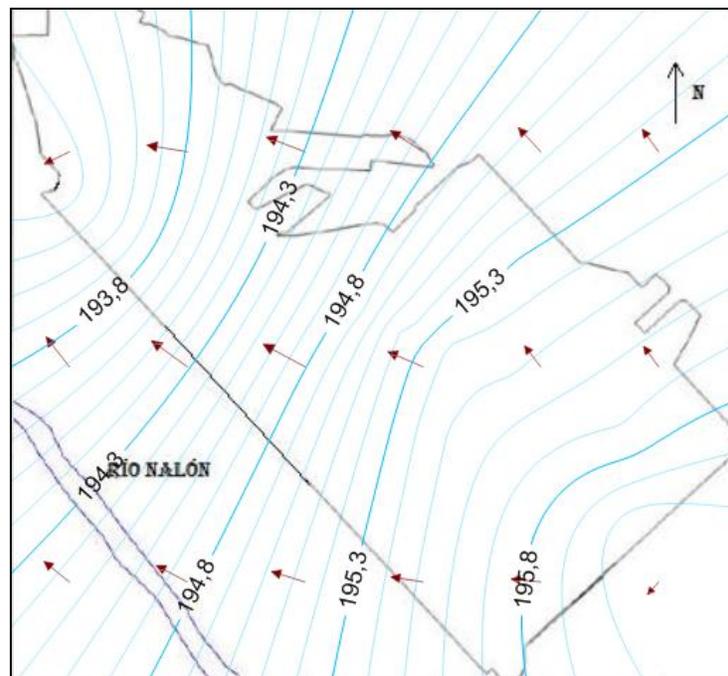


Figura 17.- Mapa de isopiezas y dirección de flujo a 22/12/2015.

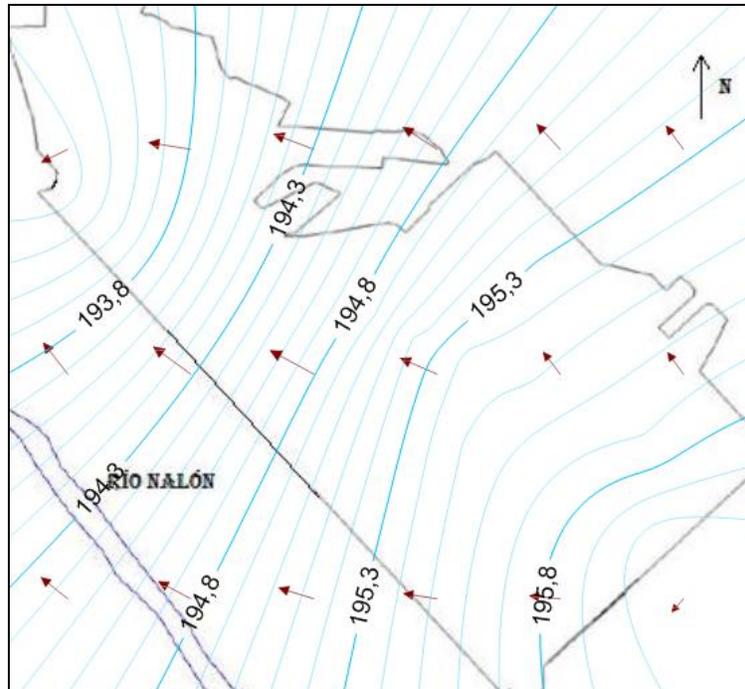
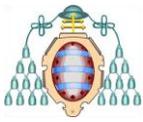
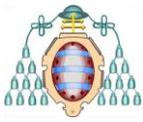


Figura 18.- Mapa de isopiezas y dirección de flujo a 06/04/2016.

Se puede observar que, salvando las diferencias de nivel piezométrico fruto de las distintas épocas del año, no hay diferencias apreciables en la distribución de las isopiezas entre unos y otros mapas. En todos los casos se presenta un esquema típico de un acuífero conectado con un río ganador, en el que la dirección del flujo avanza en la dirección del cauce hasta converger con el mismo, de modo que la posible contaminación del acuífero se dispersa con su paso al Nalón.

Para completar el estudio hidrodinámico del acuífero aluvial y su interacción con el río Nalón, además del trazado de las isopiezas y la dirección de flujo, cabe relacionar los datos de medidas del nivel freático del acuífero con el caudal del río y, para tener una visión más global que permita establecer conclusiones, también con los datos de precipitación. Se dispone de las medidas de registradores Diver en tres de los sondeos que se han representado anteriormente (S11, S13 y S20), cuyos datos se incluyen en el Anexo I.

El Diver es un registrador de datos diseñado para medir la presión y temperatura del agua. Luego las mediciones se almacenan en la memoria interna del Diver. El Diver consiste de un sensor de presión diseñado para medir la presión del agua, de un sensor de temperatura, de memoria para almacenar las mediciones y de una batería.



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



Los Divers miden la presión absoluta. Esto significa que el sensor de presión no sólo mide la presión del agua, sino también la presión de aire de empuje sobre la superficie del agua. Por tanto, los datos que se representan son una medida indirecta del nivel freático que son igual de útiles a la hora de comparar sus variaciones con las de caudal del río o de la precipitación.

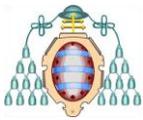
Para el mismo período que en el que se disponen los registros de los Divers, se cuenta con las medidas diarias de caudal del río Nalón (Tabla 3), registradas en la estación de aforo de la Confederación Hidrográfica del Cantábrico de Sama (Figura 19).

Tabla 3.- Medidas diarias de caudal del Nalón en Sama.

Descripción	Fecha	Caudal (m ³ /s)
Caudal río Nalón en Sama de Langreo	29/10/2014	2,10
Caudal río Nalón en Sama de Langreo	30/10/2014	2,08
Caudal río Nalón en Sama de Langreo	31/10/2014	2,04
Caudal río Nalón en Sama de Langreo	01/11/2014	2,07
Caudal río Nalón en Sama de Langreo	02/11/2014	2,02
Caudal río Nalón en Sama de Langreo	03/11/2014	2,36
Caudal río Nalón en Sama de Langreo	04/11/2014	3,02
Caudal río Nalón en Sama de Langreo	05/11/2014	5,97
Caudal río Nalón en Sama de Langreo	06/11/2014	5,06
Caudal río Nalón en Sama de Langreo	07/11/2014	3,84
Caudal río Nalón en Sama de Langreo	08/11/2014	3,29



Figura 19.- Estación de aforo del río Nalón en Sama. <https://www.chcantabrico.es>.



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



Además, se dispone de los datos de precipitación horaria registrados en la estación pluviométrica situada en el mismo punto para el período a considerar (Anexo II), de forma que se puede realizar una comparativa gráfica entre variaciones de los niveles medidos por los Divers y los datos de caudal y precipitación.

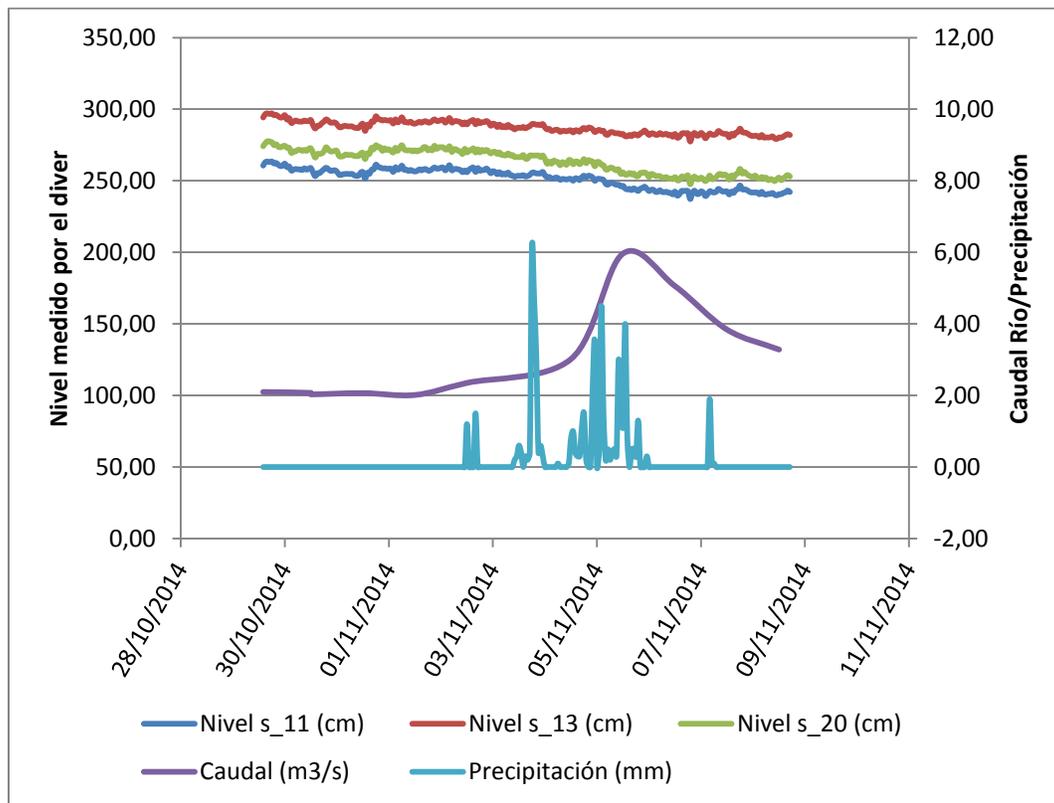


Figura 20.- Comparativa entre niveles piezométricos, precipitación y caudal del río Nalón.

En el gráfico (Figura 20) se puede observar una relación clara entre la precipitación registrada y el caudal del cauce fluvial, mostrándose el aumento del segundo como consecuencia lógica del incremento de la primera. Por el contrario, no es tan clara la relación a priori entre el nivel freático en el acuífero y la precipitación y el caudal del río, ya que la tendencia del nivel freático es descendente, sin que la escasa lluvia registrada sea suficiente para revertirla, pero sin embargo sí se aprecian pequeños picos ascendentes tras los episodios de precipitación. Para visualizar mejor este fenómeno, se presentan a continuación el gráfico que abarca el espacio temporal ceñido a los mayores picos de precipitación (Figura 21), de manera que se corrobora cómo después del mayor dato de precipitación horaria registrado (superior a 6 mm) se produce un pequeño ascenso pasajero del nivel en los tres sondeos.

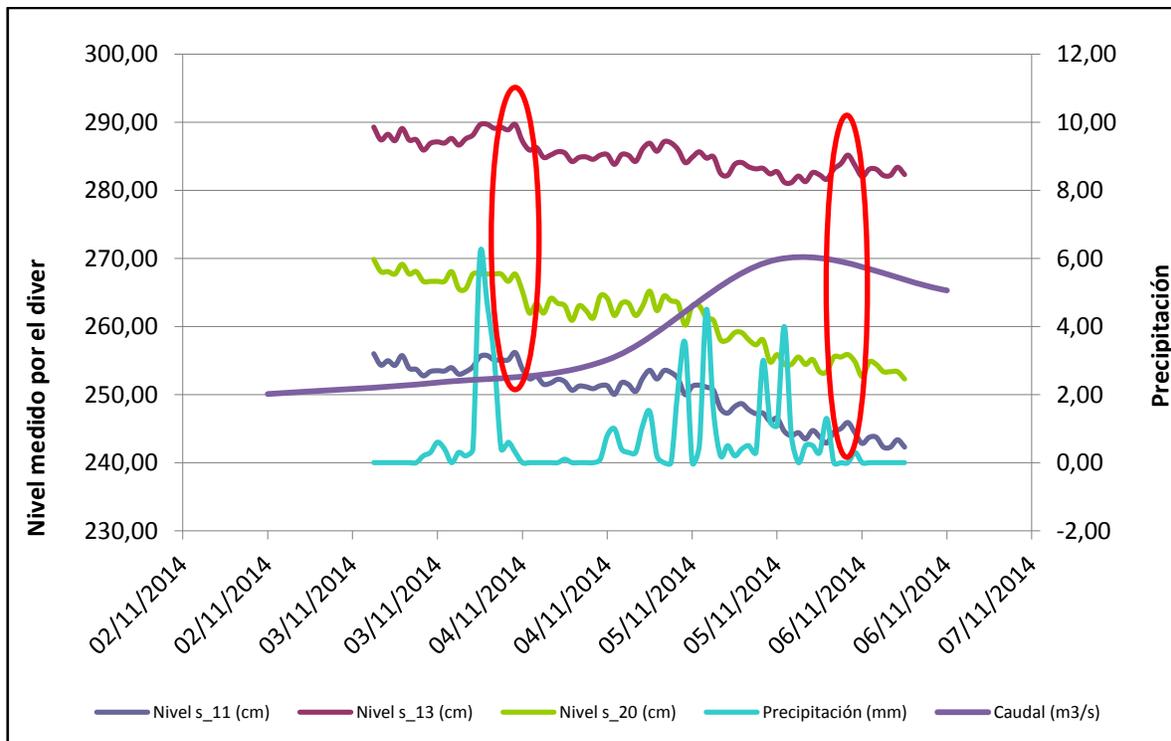
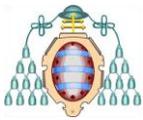


Figura 21.- Comparativa entre niveles piezométricos, caudal y precipitación de forma detallada.

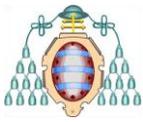
El retardo que se observa entre la precipitación y la subida del nivel freático se debe a que la reacción del acuífero respecto a la precipitación no es inmediata. Respecto a la relación entre caudal y niveles freáticos se observa una pequeña subida de éstos con posterioridad al pico de caudal máximo.

Para establecer mejor la relación río – acuífero se precisaría disponer de registros más extendidos en el tiempo, que pudiesen mostrar varios períodos con presencia y ausencia de precipitaciones y el desfase entre éstos y las subidas y bajadas del nivel freático.

8.2.2.1. Parámetros hidrogeológicos del acuífero aluvial

En primer lugar, para determinar los parámetros hidrogeológicos del acuífero aluvial se dispone tanto de los ensayos de laboratorio (permeámetros) como de los ensayos in situ, que tienen la facilidad de contar ya con numerosos sondeos realizados en el área de estudio. Ambos son complementarios entre sí, aunque los últimos son más fiables por realizarse en las condiciones reales del medio.

Dentro de los ensayos in situ, los bombeos de ensayo permiten calcular la transmisividad (T) y el coeficiente de almacenamiento (S) de un acuífero, bombeando en un sondeo y



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



midiendo descensos en otro sondeo próximo. En los terrenos de Nitrastur, aunque se realizaron ensayos de bombeo, éstos no resultaron viables porque se vaciaban con mucha rapidez los sondeos, lo cual es un indicador de la elevada permeabilidad del acuífero aluvial.

Una alternativa más sencilla son las medidas puntuales de la permeabilidad o slug tests, que no sustituyen a los bombeos de ensayo, pero que son útiles en el caso de perforaciones de pocos metros como corresponde a los sondeos de los que se dispone.

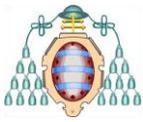
Existen dos tipos de slug tests:

- Nivel constante: Se introduce un caudal conocido para mantener constante el nivel dentro de la perforación. Estabilizado el proceso, a partir de dicho caudal y de la longitud y diámetro de la perforación, se calcula la permeabilidad
- Nivel variable: Se introduce (o se extrae) súbitamente un volumen de agua en un sondeo, lo que provoca un ascenso (o descenso) instantáneo del nivel del agua dentro de la perforación. Se miden los descensos y los tiempos empleados en ellos a medida que se recupera el nivel inicial. Es frecuente que en este ensayo se introduzca, en lugar de agua, una barra que hace subir el nivel como si se hubiera introducido un volumen de agua igual al del objeto sólido, procediendo de la denominación en inglés de la barra el nombre del ensayo (slug test).

El slug test de nivel variable empleando una barra de volumen conocido es la opción más cómoda y adecuada, ya que la barra se recupera tras cada ensayo, pudiendo utilizarla en todos los sondeos, y además la subida del nivel del agua que produce es instantánea. Por tanto, es esta la opción escogida para determinar los parámetros hidrogeológicos del acuífero aluvial.

El ensayo se realiza en ocho sondeos ubicados en el centro del recinto de Nitrastur, que tienen su parte filtrante situada en el espesor del aluvial, mientras que el resto del sondeo es ciego, por lo que únicamente están conectados hidráulicamente con el acuífero aluvial y no con el relleno superior. Se repite el mismo procedimiento en cada uno de ellos:

- Se introduce un Diver debidamente programado para tomar medida de la presión por encima del mismo cada medio segundo (la alta permeabilidad del acuífero



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



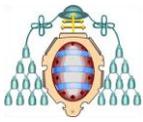
requiere que se tomen datos a intervalos de tiempo muy pequeños para poder registrar las variaciones de nivel). El Diver se baja, sujeto por una cuerda hasta una profundidad de unos 5 m, de manera que quede por debajo de la barra cuando se introduzca esta.

- Una barra de PVC de 1 m de largo y diámetro menor que el del sondeo, rellena de arena y debidamente sellada para evitar que entre agua en su interior, se introduce, sujeta por una cuerda, en el sondeo (como se muestra en la Figura 22), hasta que quede ligeramente por encima del nivel freático (en este caso, su parte inferior queda a una profundidad de unos 2 m).



Figura 22.- Barra (slag) que se introduce en los sondeos para realizar el ensayo.

- Trascurridos un par de minutos desde que el Diver esté midiendo, la barra se deja bajar rápidamente (sin dejarla totalmente libre, para evitar que el Diver registre un golpe de presión al entrar ésta en el agua) hasta una profundidad en la que esté sumergida por completo y quede por encima del Diver.



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



- Se deja la barra sumergida hasta transcurridos unos 10 minutos, cuando el nivel en el sondeo haya descendido hasta el valor previo a la introducción de la barra (se comprueba periódicamente con un hidronivel). Se saca la barra de forma rápida, provocando un descenso del nivel de agua en el sondeo.
- Se deja el Diver midiendo durante varios minutos, hasta que el nivel se haya recuperado hasta su posición original (se comprueba periódicamente con un hidronivel).
- Concluye el ensayo sacando el Diver y extrayendo los datos registrados, con lo que puede pasarse a otro sondeo.

Elaborando un gráfico (Figura 23) con los registros del Diver frente al tiempo, se puede observar la subida de presión que se produce al dejar caer la barra, y como se va recuperando hasta el nivel original. De la misma manera, cuando se extrae la barra, se registra una bajada de presión, que se va recuperando de forma asintótica.

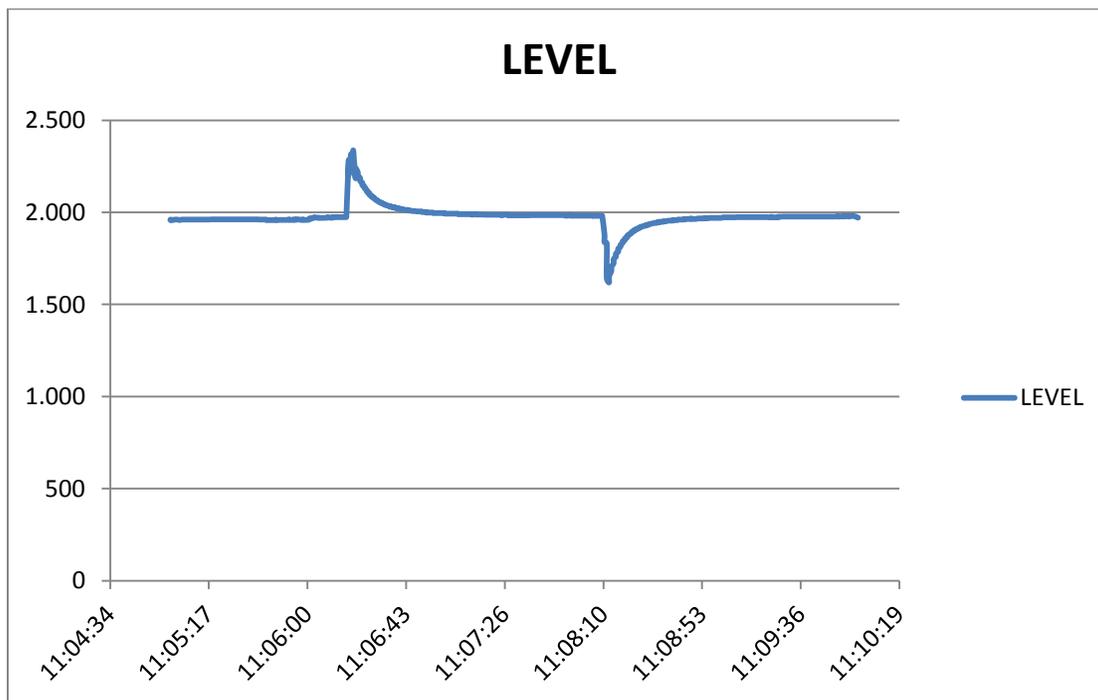
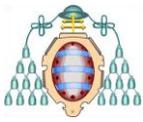


Figura 23.- Gráfico de los registros del Diver en uno de los sondeos (nivel frente al tiempo) al realizar el slug test.

En base a los datos que proporciona el slug test, son diversos los métodos existentes para determinar la permeabilidad del acuífero estudiado utilizando fórmulas matemáticas en las que se introducen valores relativos a la geometría del sondeo así como datos de variaciones



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



de nivel durante el ensayo y el tiempo necesario para las mismas. Estos cálculos pueden realizarse tanto teniendo en cuenta el descenso de nivel tras la inmersión de la barra como la recuperación que tiene lugar tras extraerla, si bien la primera opción presenta ciertos inconvenientes:

- Como ya se ha comentado, la entrada de la barra en el agua puede producir un golpe de presión que distorsione el registro del Diver e impida obtener con claridad las variaciones de nivel.
- Si la zona filtrante del sondeo abarca por encima de la zona saturada, la subida de nivel al sumergir la barra provoca que parte del agua que desplaza se filtre a la zona no saturada, alterando el ensayo.

Por las razones anteriores, es más conveniente utilizar para el cálculo de la permeabilidad el registro de la recuperación del nivel en el sondeo tras sacar la barra, empleando el método de Lefranc con nivel variable, ya que es uno de los utilizados generalmente en geología y geotecnia tanto para medidas de ascensos como de descensos de nivel, y se dispone de todos los datos necesarios para el cálculo.

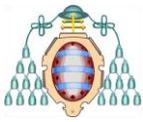
La fórmula empleada para el cálculo de la permeabilidad es la siguiente:

$$K = \frac{d^2 \cdot \ln\left(\frac{2L}{d}\right)}{8L \cdot t} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Siendo cada uno de los parámetros:

- K = conductividad hidráulica
- h_1 y h_2 = diferencia de altura del agua con el nivel inicial al principio y al final del intervalo de tiempo seleccionado
- t = tiempo transcurrido entre la medición de los niveles h_1 y h_2
- L = longitud de la zona filtrante
- d = diámetro del sondeo

Los sondeos en los que se realiza el ensayo de slug test tienen un diámetro de 3" y la longitud de la zona filtrante es de 3 m. Se toman intervalos de 10 s de tiempo en las



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



recuperaciones de nivel tras sacar la barra, utilizando el mínimo nivel registrado tras sacar la barra y el nivel medido tras los 10 segundos correspondientes. En cada uno de los sondeos se registran los distintos niveles para el intervalo de tiempo seleccionado, obteniendo el valor de coeficiente de permeabilidad correspondiente que se muestra en la Tabla 4:

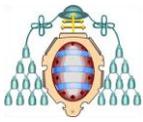
Tabla 4.- Cálculo del coeficiente de permeabilidad para cada uno de los sondeos.

Sondeo	K (m/d)
IW1	393,80
IW2	1025,19
IW4	777,35
IW5	1561,44
IW6	236,06
IW7	1369,36
IW8	605,27
IW9	1270,09

Con los datos anteriores se determina que la permeabilidad media del aluvial en la zona en la que se realizan los ensayos de slug test es de 905 m/d, lo que se corresponde con una permeabilidad media-alta.

8.2.2.2. Parámetros hidrogeológicos del relleno antrópico

Por lo que respecta a las características hidrogeológicas del terreno situado por encima del acuífero aluvial, principalmente formado por relleno de origen antropogénico, en el ámbito de la parcela de estudio se presenta una capa de espesor variable de materiales procedentes de diversas industrias (Siderurgia, Baterías Cok, Fábricas de fertilizantes, lavaderos de carbón, central térmica, etc.).



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



Buena parte de la parcela de Nitrastur, la parte central, presenta cenizas de tostación de pirita como material de relleno, y es sobre este material, por su extensión y profundidad, sobre el que se realiza el estudio de sus parámetros hidrológicos. Tratándose de ensayos de permeabilidad de suelo-relleno, y ya que los sondeos de los que se dispone profundizan en el acuífero subyacente, el procedimiento más accesible es de la medida de la conductividad hidráulica en laboratorio mediante una muestra inalterada.

Las muestras del relleno de cenizas de pirita se toman con una perforadora, en la zona central de la parcela, de la manera que se observa en la Figura 24.

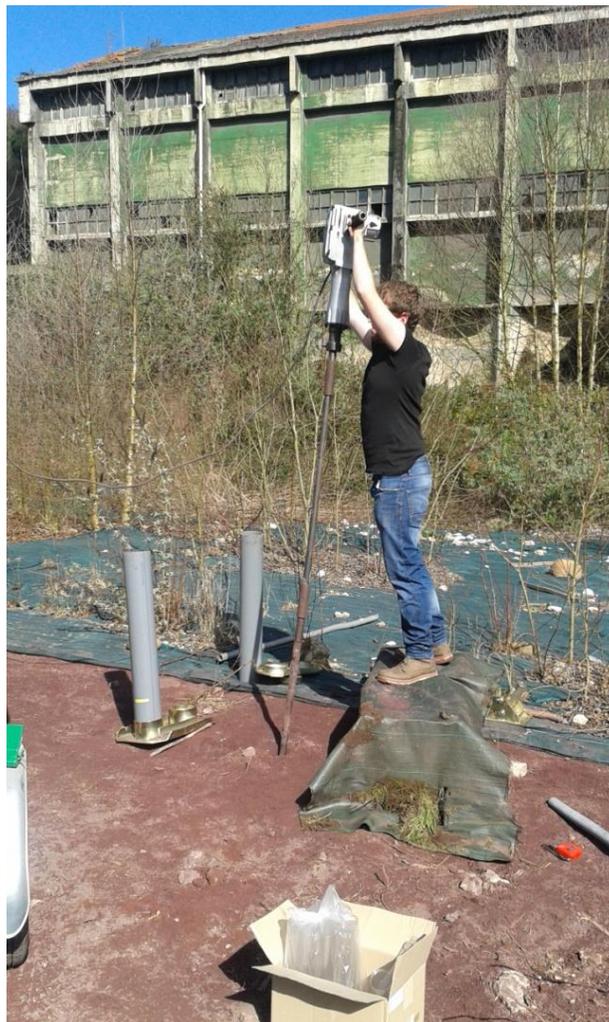
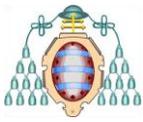


Figura 24.- Toma de muestras del relleno de cenizas de pirita.

La perforadora permite tomar testigos de 1 m de largo, pero una vez extraído éste, colocando una barra adicional de 1 m de longitud se puede perforar y extraer 1 m más, y así sucesivamente. De esta forma se extraen muestras del relleno desde la superficie hasta una



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



profundidad de 2,5 m, alcanzando la interfaz con el aluvial, lo que impide seguir profundizando.

Tras cada profundización, la barrena se extrae empleando un mecanismo diseñado a tal fin, que permite, mediante el uso de palancas, facilitar la labor (Figura 25).

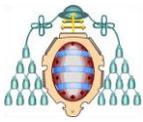


Figura 25.- Mecanismo empleado para extraer la barrena del suelo.

Una vez se tiene la barrena en el exterior, el diseño de la misma y la compacidad del material en su interior imposibilitan la obtención de una muestra inalterada, resultando el ensayo en la necesidad de reconstruir las muestras ante la alteración que sufren al extraerlas de la barrena.

Los testigos obtenidos y reconstruidos, tras su almacenamiento, están listos para ser empleados en un ensayo de permeabilidad en laboratorio. Para esto, se seleccionan diversas muestras en base a su distinta distribución original en el terreno así como a su estado.

En el primer tramo (más superficial, procedente del primer metro) se selecciona una muestra hacia la mitad del mismo, ya que en la parte superficial se encontraba la muestra sin estructurar.



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



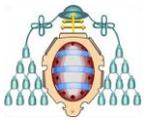
En el tercer tramo (procedente de entre 2 m-2,5 m de profundidad) se seleccionan dos muestras ya que presentaba una mayor consistencia que el primer tramo, aunque una textura semifluida.

En el segundo tramo (intermedio entre los anteriores), se encontraba una textura intermedia, que se asemejaba más a un suelo estructurado, por lo que se seleccionan tres muestras. Los testigos no eran totalmente cilíndricos (al extraer el material de la barrena se había deformado), por lo que se intenta obtener muestras que ocupen todo el cilindro portamuestras.

Las muestras que se seleccionan se introducen en los portamuestras del permeámetro y, antes de realizar el ensayo, se tienen que dejar alrededor de un día en agua hasta saturarse. Para esto, en primer lugar se coloca papel de filtro tapando una de las caras de la muestra, sujetándolo con una goma, como se muestra en la Figura 26.



Figura 26.- Muestra para ensayo de permeabilidad preparada, con el papel de filtro colocado.



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



Las muestras para saturar se colocan en una bandeja que contenga un par de centímetros de agua, con el filtro en la cara inferior (Figura 27), de manera que saturen por capilaridad.

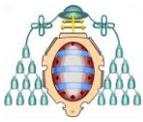


Figura 27.- Muestras situadas en la bandeja para su saturación.

Tras disponer de las muestras en estado de saturación, para su colocación en el permeámetro, se disponen éstas en los soportes correspondientes, con la cara del filtro situada hacia abajo (Figura 28).



Figura 28.- Muestra colocada en el soporte del permeámetro.



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



El permeámetro permite medir la conductividad hidráulica de los materiales de forma directa mediante la medición de la cantidad de fluido que los atraviesa y el tiempo que emplea en ello. Existen dos tipos de permeámetros, los de carga variable y los de carga constante, siendo éste último el utilizado en el ensayo, en el que se mantiene el nivel de agua constante con un tubo alimentador conectado al aparato, y cuya disposición se puede ver en la Figura 29.

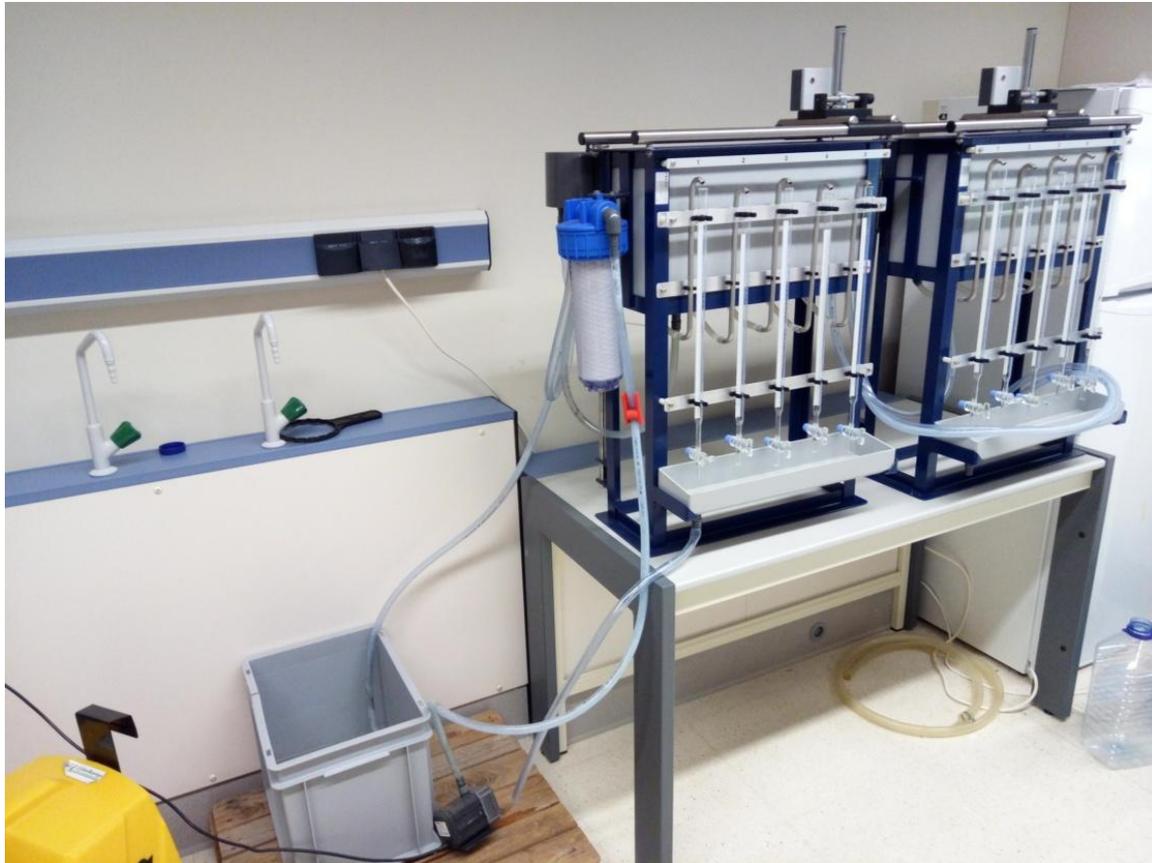


Figura 29.- Modelo de permeámetro empleado en el ensayo.

Las muestras se colocan con el soporte correspondiente en el permeámetro y el agua las atraviesa de abajo hacia arriba, movida por la diferencia de carga con el nivel constante mantenido en el permeámetro. El agua que pasa a través de cada muestra discurre por un tubo (como se aprecia en la Figura 30) hasta caer sobre las buretas situadas en la parte delantera, lo que permite medir los volúmenes de agua y, utilizando un cronómetro, el tiempo empleado en atravesar las muestras.

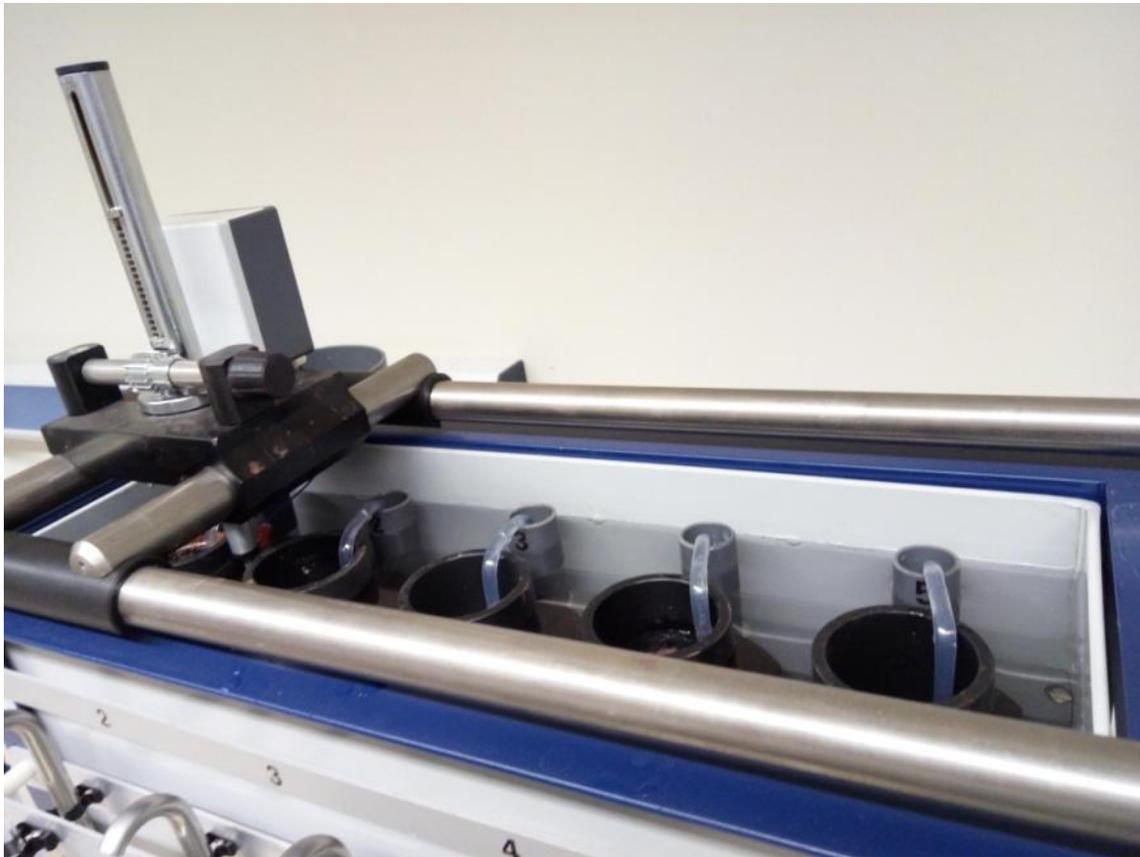
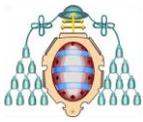


Figura 30.- Disposición de las muestras en el permeámetro para que el agua discorra hasta las buretas.

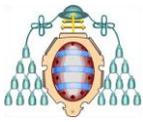
Los datos que es necesario tomar en el ensayo para calcular el coeficiente de permeabilidad son, aparte de los volúmenes de agua y los tiempos correspondientes, la superficie y la longitud de las muestras (que vienen dadas por el portamuestras), y la diferencia de altura del nivel del agua dentro y fuera del soporte de las muestras, para lo que se emplea el sensor situado sobre el permeámetro, que se ilumina cuando se entra en contacto con el agua, señalando la medición correspondiente.

El coeficiente de permeabilidad se calcula mediante la fórmula:

$$K = 864 \cdot \frac{V \cdot L}{A \cdot t \cdot h}$$

Siendo:

- K = coeficiente de permeabilidad (m/d)
- V = volumen de agua medido en la bureta (cm³)
- L = longitud de la muestra (cm)



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



- A = área de la muestra (cm^2)
- t = tiempo en el que el volumen V atraviesa la muestra (s)
- h = diferencia de altura del nivel de agua fuera y dentro del soporte de la muestra (cm)

Una vez realizado el ensayo se obtienen los siguientes valores (Tabla 5):

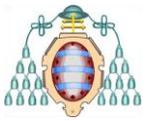
Tabla 5.- Resultados del ensayo de permeabilidad de las muestras de cenizas de pirita.

	Tramo 1º (0-1 m prof.)	Tramo 2º (1-2 m prof.)	Tramo 2º (1-2 m prof.)	Tramo 2º (1-2 m prof.)	Tamo 3º (2-2,5 m prof.)	Tamo 3º (2-2,5 m prof.)
K (m/d)	120,23	8,54	137,51	0,68	234,68	-
V (cm3)	40	11	40	7	40	-
h (cm)	1,2	2,7	2	3	1,5	-
L (cm)	5	5	5	5	5	-
A (cm2)	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	-
t (s)	61	105	32	760	25	-

Una de las muestras del último tramo no ha permitido el paso del agua a su través. Esto puede deberse a que cuando se preparó la muestra tenía una gran humedad y pudo haberse compactado en exceso.

En general se obtienen resultados bastante dispares entre unas muestras y otras, fruto de la gran alteración que sufrían las mismas, lo que producía:

- Por un lado, que las muestras no se ajustasen perfectamente al portamuestras, pudiendo permitir que el agua pasase por los bordes de las mismas, lo que tendría como resultado un coeficiente de permeabilidad más alto del real.
- Por la otra parte, la reconstrucción artificial de las muestras pudo desembocar en



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



una compactación artificial que proporcionase un resultado de permeabilidad más baja de la real.

Teniendo en cuenta lo anterior, es difícil valorar qué resultados se aproximan más a la realidad y qué coeficiente de permeabilidad tiene el relleno de cenizas de piritas como término medio, si bien se puede estimar que éste se correspondería con una permeabilidad entre baja y media, basándose en los valores de la Figura 31.

Saturated permeability [m/d] at 20°C

	10 ⁴	10 ³	10 ²	10 ¹	10 ⁰	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶
Class	High		Medium		low		Very low		Practically impermeable		
Material	Gravel		Sand		Sandy clay Silt Mix of sand, silt and clay		Loess Loam		Homogeneous clay Structured clay		

Figura 31.- Permeabilidad según su coeficiente y tipo de material con el que se corresponde. Eijkelkamp (2011).

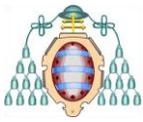
Se tiene, por tanto, un relleno antrópico de permeabilidad baja o media en el caso de la zona de estudio, y que tampoco distará mucho en el caso del resto de superficie sobre el acuífero aluvial, ya que se trata de un área prácticamente urbanizado en su totalidad, lo que explica la lentitud con la que el aumento de la precipitación se refleja de manera notable en el nivel del acuífero. Por su lado, la mayor permeabilidad del propio aluvial plantea una mayor movilidad de las sustancias contaminantes una vez que éstas pasan al mismo, con su consiguiente aporte al río Nalón.

8.2.3. HIDROGEOQUÍMICA

8.2.3.1. Parámetros físicos: pH y C.E.

A la hora de analizar la hidrogeoquímica del acuífero aluvial desde el punto de vista de la contaminación, la zona que presenta mayor espesor de relleno de cenizas de tostación de piritas es la indicada para realizar el estudio por el alto contenido de sustancias contaminantes en el suelo.

En este marco, aprovechando la existencia de más proyectos relacionados con el tema de estudio, se realiza una campaña de muestreo de aguas utilizando sondeos ubicados en la zona central de la parcela (Figuras 32 y 33).



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado

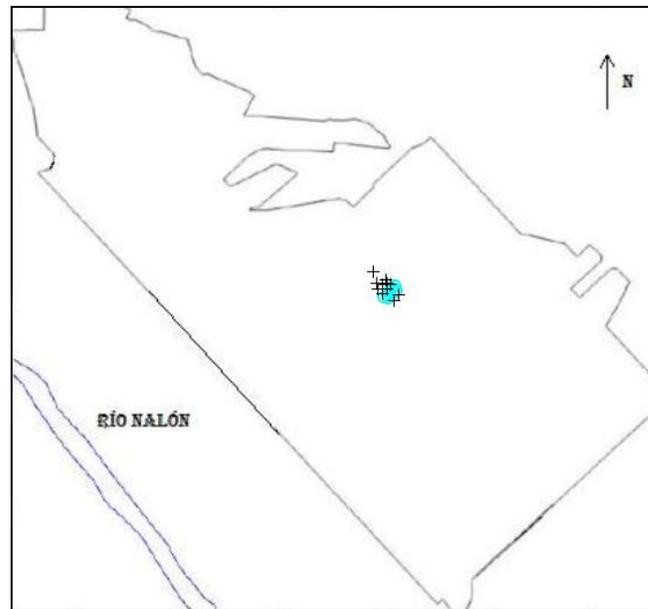


Figura 32.- Situación de los sondeos en la zona central de la parcela.

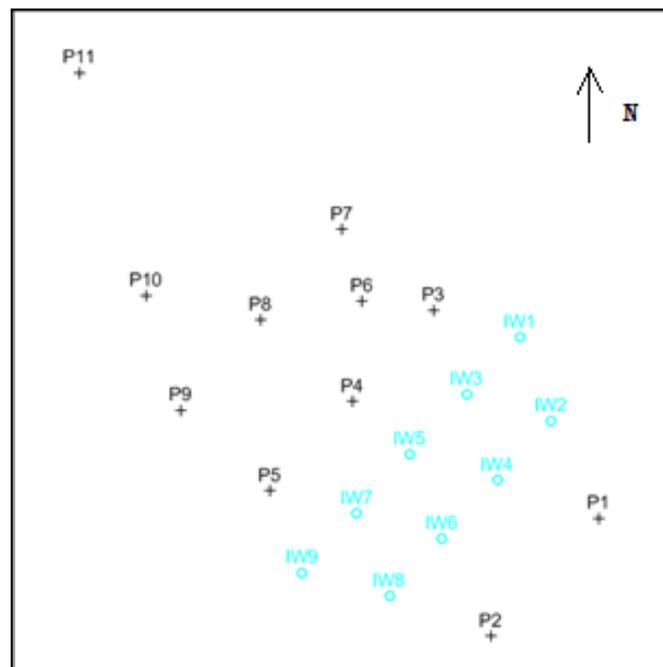
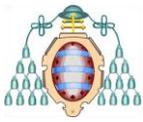


Figura 33.- Detalle de la situación de los sondeos utilizados en el muestreo.

La toma de muestras de agua para su envío a laboratorio se realiza mediante el bombeo desde el interior del sondeo utilizando una bomba peristáltica. Se bombea el agua durante unos diez minutos, haciéndola pasar por una sonda medidora de pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y temperatura, como se aprecia (además del uso del hidronivel) en la Figura 34.



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado

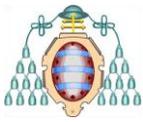


Figura 34.- Bombeo de agua con la bomba peristáltica mientras se mide el nivel piezométrico.

Una vez que los valores medidos por la sonda se estabilizan se procede a la toma de la muestra. En el caso que ocupa, se toma una muestra directamente desde el agua extraída por la bomba en una botella de cristal, debidamente etiquetada, de 250 ml y, utilizando una jeringuilla y filtros, se llenan dos botellas más de 50 ml cada una (Figuras 35 y 36).



Figura 35.- Campaña de muestreo.



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



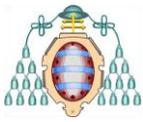
Figura 36.- Relleno con filtro y jeringuilla de una botella de muestra.

Las muestras deben almacenarse debidamente refrigeradas, a una temperatura aproximada de 4°C, sin que lleguen a congelarse, hasta su envío al laboratorio.

Fruto del muestreo descrito, mediante la sonda se obtienen los siguientes valores de los parámetros físicos del agua en el acuífero aluvial (Tabla 6):

Tabla 6.- Resultados del los muestreos.

Sample ID	Basic parameters					
	16/03/2017		06/04/2017		03/05/2017	
	pH	EC(μS/cm)	pH	EC(μS/cm)	pH	EC(μS/cm)
P1	6,75	1021,09	6,76	1080,54	6,71	1008,29
P2	6,33	806,50	6,41	791,40	6,38	781,08
P3	3,42	2872,29	4,02	2275,58	4,38	1758,55
P4	3,17	2447,90	3,21	2472,28	3,24	2253,50
P5	6,82	1567,06	6,87	1339,72	6,53	1137,75
P6	4,75	1969,47	4,68	2138,79	4,49	1966,47
P7	3,67	2414,15	3,78	2596,70	3,88	2313,11
P8	5,41	1631,47	5,62	1489,38	5,88	1350,00
P9	5,86	1487,71	6,26	1306,05	6,51	1141,67
P10	6,01	1473,76	6,34	1303,50	6,30	1142,80
P11	5,92	1483,29	6,04	1506,23	5,87	1469,50
IW1	6,35	904,07	6,43	886,50	6,42	887,45
IW2	2,41	6566,47	3,13	2700,74	3,28	2169,75
IW3	2,92	3107,56	3,30	2049,91	3,51	1593,29
IW4	3,48	2144,88	3,51	1987,29	3,55	1691,00
IW5	3,22	2765,37	3,40	2611,87	5,56	1176,06
IW6	6,06	916,84	5,91	861,05	5,69	868,18
IW7	6,26	1481,71	6,48	1264,12	6,84	1073,38
IW8	6,78	1354,58	6,71	1512,90	6,68	1144,23
IW9	6,74	1382,44	6,76	1240,48	6,78	1019,33



En base a los resultados mostrados, se observa que en general se tiene un agua de carácter ligeramente ácido, pero que en alguno de los puntos muestreados alcanza una acidez importante, lo que se mantiene constante a lo largo del tiempo, con pocas variaciones en los valores determinados en cada sondeo. La distribución de los valores de pH en la zona de muestreo se representa en la Figura 37.

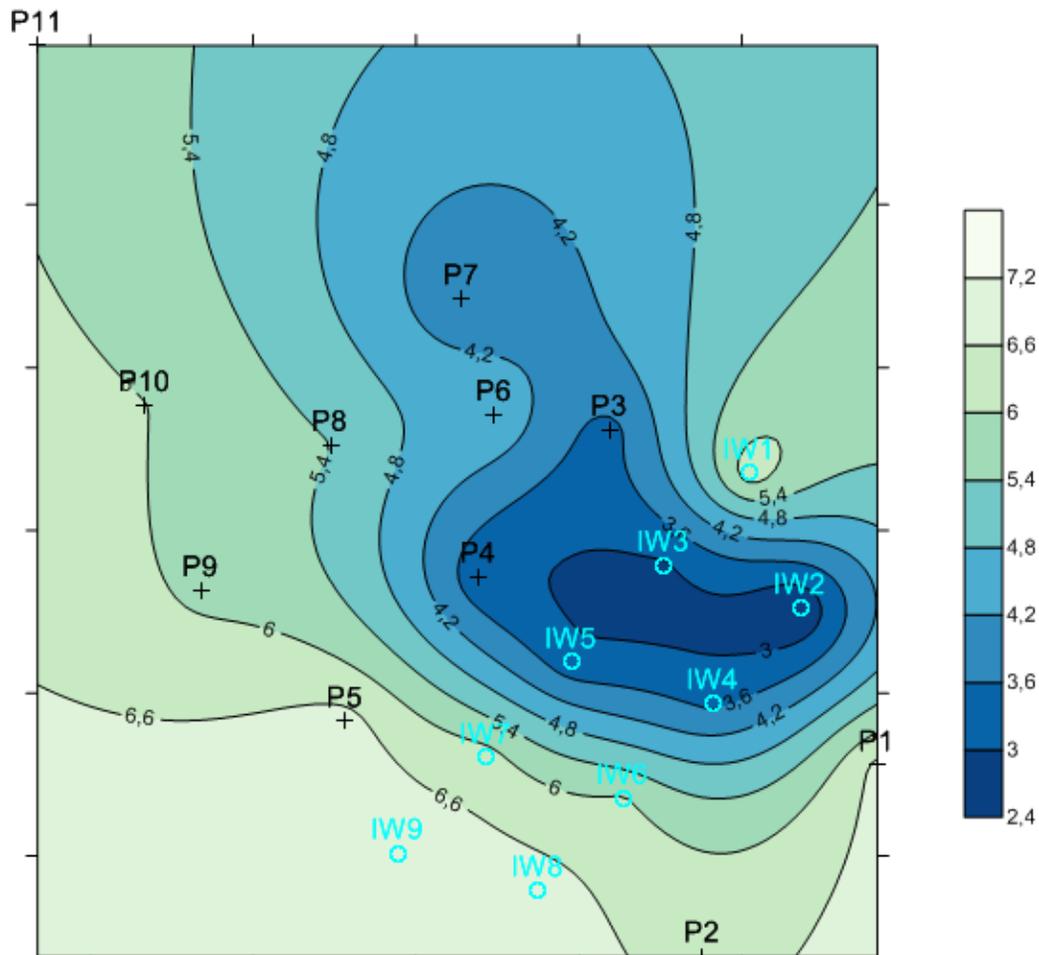
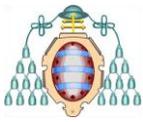


Figura 37.- Distribución de los valores del pH en la zona de los sondeos, según el muestreo del 16/03/2017.

Puede observarse además cierta correlación entre los valores de pH y los de la conductividad eléctrica (Figura 38), de manera que se relaciona la acidez de agua con la concentración de sólidos disueltos. De esta manera se establece una línea de unión de la contaminación del agua del acuífero con la disolución de sustancias procedentes del relleno antrópico, presentándose a priori una contaminación más localizada en los puntos en los que, por algún factor, se concentran la filtración de agua arrastrando elementos contenidos en las cenizas de pirita.



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado

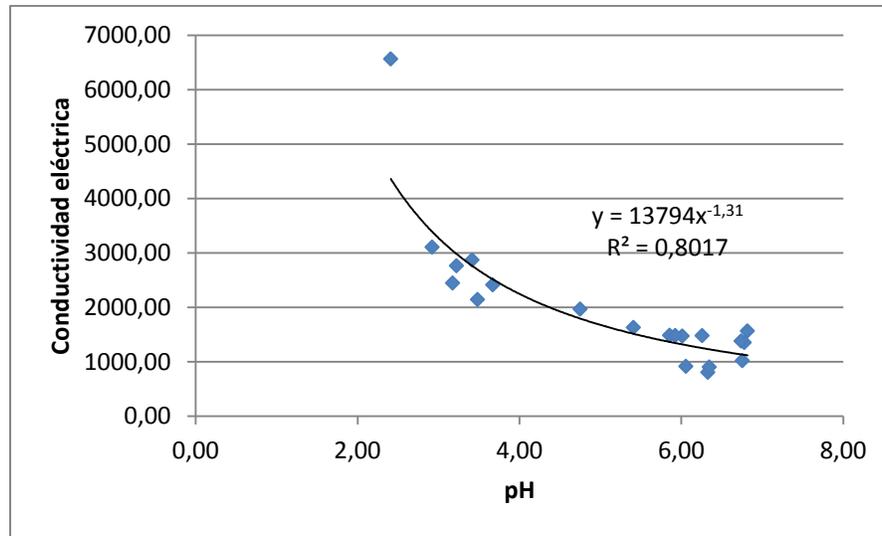


Figura 38.- Correlación entre el pH y la conductividad eléctrica en el muestreo del 16/03/2017.

8.2.3.2. Facies hidroquímicas de las aguas

A falta de disponer en tiempo de los resultados de los análisis de laboratorio de las muestras anteriormente detalladas, y de cara a evaluar las facies hidroquímicas de las aguas del acuífero aluvial, se cuenta con resultados de análisis hidroquímicos de muestras tomadas en diversos sondeos (representados en la Figura 39), en marzo de 2015 y marzo de 2016, lo que permite tanto llevar a cabo el estudio propuesto como evaluar su variación temporal. Estos resultados se muestran en la Tabla 7.

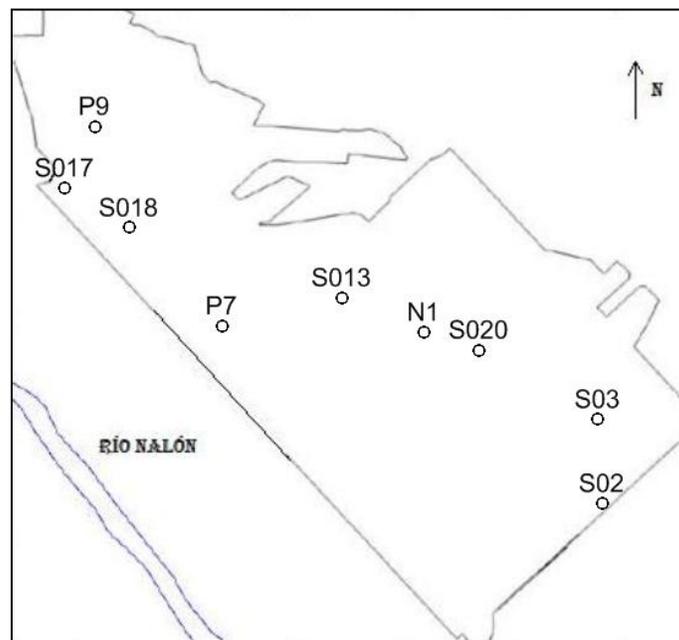
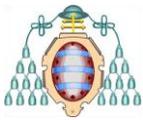


Figura 39.- Sondeos en los que se dispone de resultados de análisis hidroquímico.



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado

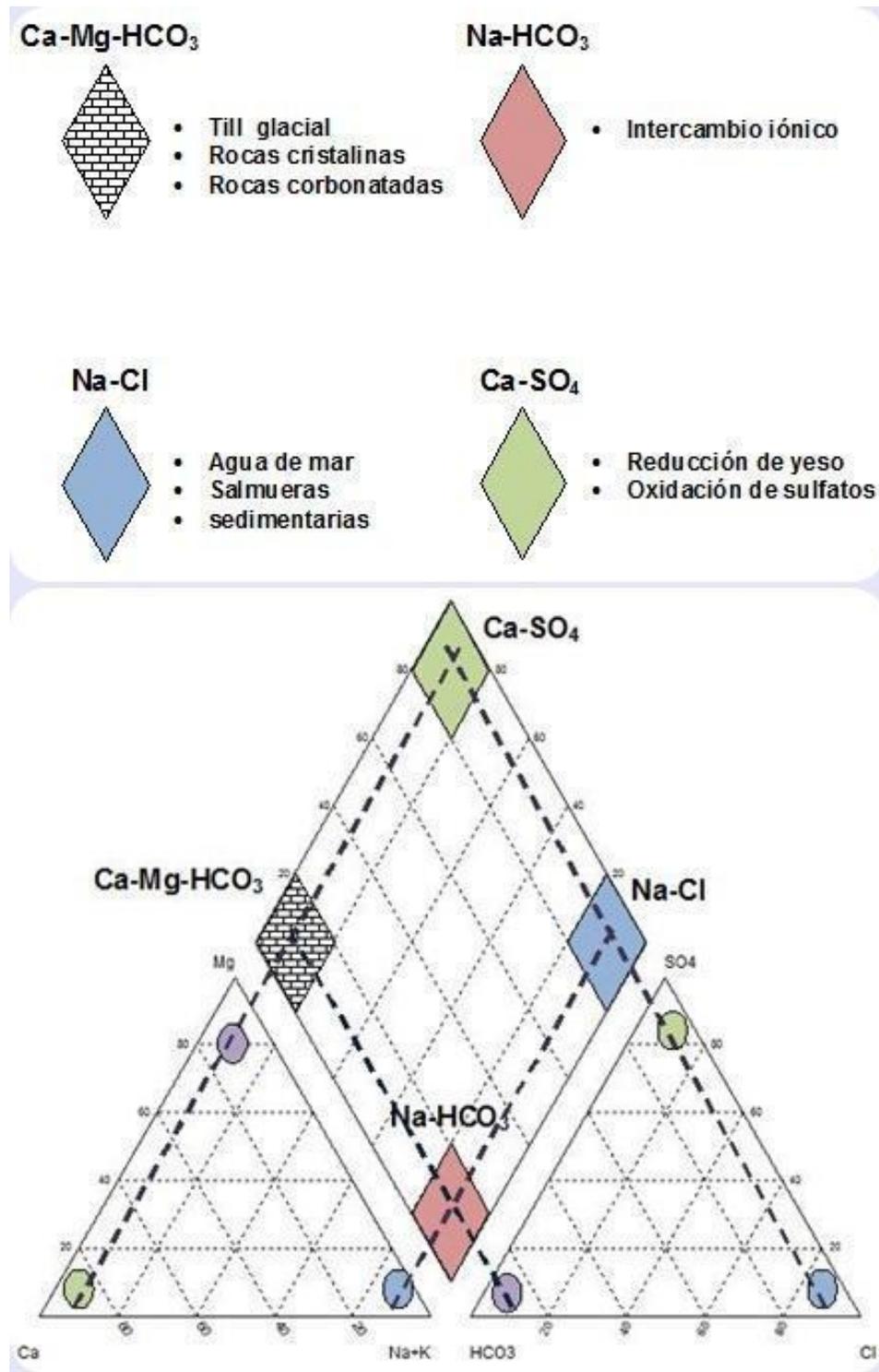
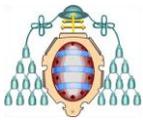


Figura 40.- Clasificación de las aguas en el diagrama de Piper y procesos y rocas relacionados con las mismas. <http://www.aguaysig.com/>.

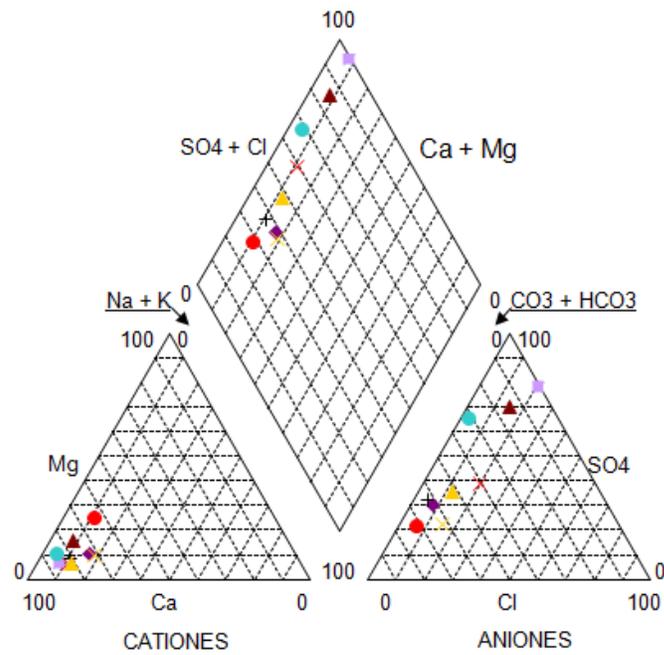
Con los datos de los que se dispone, para cada uno de los análisis temporales, se elaboran los siguientes diagramas de Piper (Figura 41):



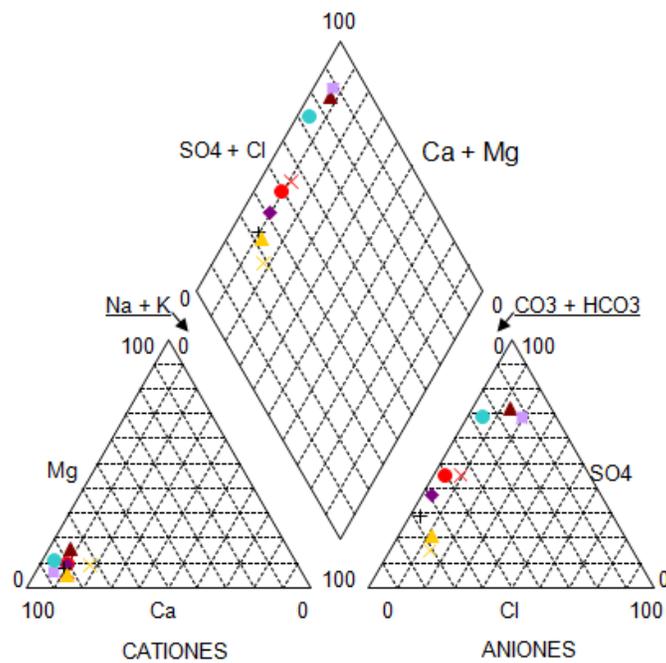
Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



Marzo 2015

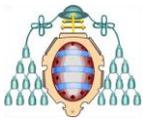


Marzo 2016



● S02 ◆ S03 ▲ S013 ■ S017 × S018 + S020 ● N1 ▲ P7 × P9

Figura 41.- Diagrama de Piper para el análisis hidroquímico de marzo de 2016.



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



En base a los diagramas de Piper, se observan pequeñas variaciones en la composición química de las aguas entre uno y otro análisis, si bien las muestras entre las que se observa más variación temporal se mantienen en ambos casos a medio camino entre las aguas sulfatadas y las bicarbonatadas.

Cabe destacar como las muestras correspondientes al sondeo S17 son las de mayor contenido en sulfatos.

También en los sondeos S13 y N1 se presentan aguas de marcado carácter sulfatado, lo que es lógico relacionar con que se encuentran situados en una zona en la que el relleno antrópico está constituido por cenizas de pirita, que serían el origen de la anomalía. Por otro lado, por ejemplo, los sondeos S02 y S03, que se encuentran en el extremo de la parcela, de manera que el flujo de agua en el acuífero aún no ha atravesado zonas contaminadas, muestran menor afección por parte de la oxidación de sulfatos, aunque con alguna variación entre uno y otro análisis, probablemente fruto de las condiciones meteorológicas que se presentasen en los días previos a cada caso.

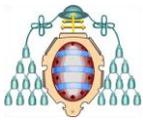
En general, las diferentes composiciones químicas de cada muestra pueden atribuirse a la heterogeneidad del relleno antrópico, tanto respecto al espesor como a la composición del mismo.

8.2.3.3. Metales

Para algunos de los sondeos en los que se dispone de análisis hidroquímicos se cuenta también con resultados de análisis multielemental cuantitativo para 8 elementos metálicos (Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg y Pb) en distintas fechas distribuidas entre los años 2013 y 2016. En las Tablas 8 a 15 se presentan los resultados de dichos análisis para cada uno de los elementos:

Tabla 8.- Análisis elemental de los contenidos en Cromo.

	jun-13	may-14	mar-15	jun-15	sep-15	dic-15	mar-16
Sondeo	Cr (µg/l)						
N1	0,11	<2,0	-	-	-	-	-
S-03	0,30	<2,0	-	-	-	-	-
S-13	-	5,3	-	-	-	-	-
S-17	0,59	-	0,17	1,62	0,74	0,43	0,15
S-18	1,05	<2,0	-	-	-	-	-
S-20	0,74	<2,0	-	-	-	-	0,11



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



Tabla 9.- Análisis elemental de los contenidos en Níquel.

	jun-13	may-14	mar-15	jun-15	sep-15	dic-15	mar-16
Sondeo	Ni (µg/l)						
N1	3,34	<5,0	10,66	2,36	1,4	1,87	12,24
S-03	1,67	<5,0	3,03	1,29	0,94	1,44	2,14
S-13	-	38	41,24	19,89	14,76	15,38	41,71
S-17	55,89	-	11,88	39,86	33,62	28,18	5,9
S-18	8,37	<5,0	2,24	2,06	1,98	1,45	2,45
S-20	2,41	<5,0	0,62	0,26	1,16	0,87	0,67

Tabla 10.- Análisis elemental de los contenidos en Cobre.

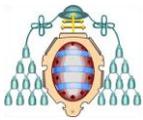
	may-09	jun-13	may-14	mar-15	jun-15	sep-15	dic-15	mar-16
Sondeo	Cu (µg/l)							
N1	-	13,49	33	16,85	6,42	2,75	5,78	8,16
S-03	<5	1,94	14	4,09	1,18	1	1,94	2,08
S-13	110,00	-	230	10,79	7,94	5,46	6,95	8,65
S-17	14,00	418,79	-	9,78	480,16	397,73	265,9	8,69
S-18	<5	9,46	5,8	4,46	4,78	4,21	3,7	4,29
S-20	<5	5,54	6,3	1,45	1,09	4,07	1,92	1,18

Tabla 11.- Análisis elemental de los contenidos en Zinc.

	may-09	jun-13	may-14	mar-15	jun-15	sep-15	dic-15	mar-16
Sondeo	Zn (µg/l)							
N1	-	106,21	130	379,85	74,98	22,39	51,04	445,5736
S-03	19,00	15,08	76	27,78	12,9	6,9	28,6	36
S-13	200,00	-	240	162,72	53,94	39,78	46,87	158,87
S-17	77,00	854,91	-	83,5	493,24	531,44	497,6	47,24
S-18	66,00	153,38	100	47,79	55,84	44,42	36,48	48,09
S-20	10,00	55,58	41	7,01	5,44	10,38	15,5	6,62

Tabla 12.- Análisis elemental de los contenidos en Arsénico.

	may-09	jun-13	may-14	mar-15	jun-15	sep-15	dic-15	mar-16
Sondeo	As (µg/l)							
N1	-	165,71	1100	5555,23	781,72	265,62	566,61	12887,4
S-03	<5	1,37	16,4	12,37	2,04	1,33	12,58	8,71
S-13	1.500,00	-	3000	2883,7	3091,01	3150,81	2609,16	2828,46
S-17	<5	1,37	-	0,68	4,9	3,57	3,58	0,45
S-18	<5	1,89	<5,0	8,09	3,1	4,46	1,44	5,72
S-20	20,00	21,20	51,8	27,76	22,44	27,45	43,84	31,34



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



Tabla 13.- Análisis elemental de los contenidos en Cadmio.

	may-09	jun-13	may-14	mar-15	jun-15	sep-15	dic-15	mar-16
Sondeo	Cd (µg/l)							
N1	-	0,63	0,47	0,86	0,18	0,12	-	-
S-03	<0,4	0,55	0,34	-	0,22	0,13	-	-
S-13	0,89	-	1,3	0,43	0,22	0,15	-	-
S-17	<0,4	2,82	-	0,23	1,64	1,87	-	-
S-18	1,10	1,46	1,3	0,51	0,52	0,46	-	0,23
S-20	<0,4	0,65	0,22	0,1	-	0,11	-	-

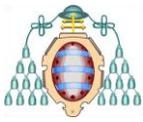
Tabla 14.- Análisis elemental de los contenidos en Mercurio.

	jun-13	may-14	mar-15	jun-15	sep-15	dic-15	mar-16
Sondeo	Hg (µg/l)						
N1	<1,0	0,14	-	-	-	0,1	-
S-03	<1,0	<0,03	-	-	-	0,18	-
S-13	-	0,06	-	-	-	-	-
S-17	<1,0	-	-	-	-	-	-
S-18	<1,0	<0,03	-	-	-	-	-
S-20	<1,0	0,04	-	-	-	-	-

Tabla 15.- Análisis elemental de los contenidos en Plomo.

	may-09	jun-13	may-14	mar-15	jun-15	sep-15	dic-15	mar-16
Sondeo	Pb (µg/l)							
N1		0,42	83	1,14	-	0,27	0,75	-
S-03	7,00	0,67	28	0,43	-	0,13	0,23	0,26
S-13	97,00		59	-	-	0,14	0,12	-
S-17	<5	8,26		18,17	22,84	10,03	68,78	12,02
S-18	<5	0,77	<5,0	1,69	0,89	0,91	0,59	0,38
S-20	<5	0,38	17	0,1	-	0,24	0,56	0,11

Los resultados anteriores se muestran poco útiles si no se comparan con valores de referencia que permitan evaluar el grado de contaminación en que resulta la presencia de metales pesados en el agua. En Asturias no se dispone de Niveles Genéricos de Referencia para metales pesados en el suelo, pero no así para el caso de las aguas, por lo que se opta por tomar como referencia los criterios holandeses (Tabla 16) ya que, al carecer de niveles establecidos propios, se viene utilizando de forma habitual la norma de éste país, pionero en el desarrollo y promulgación de guías para afrontar la contaminación de suelos y aguas.



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



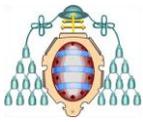
Tabla 16.- Criterios holandeses en aguas subterráneas para los metales analizados.

Elemento	Valor de referencia ($\mu\text{g/l}$)	Valor de intervención ($\mu\text{g/l}$)
Cromo	1	30
Níquel	15	75
Cobre	15	75
Cinc	65	800
Arsénico	10	60
Cadmio	0,4	6
Mercurio	0,05	0,3
Plomo	15	75

En las tablas de resultados de los análisis se ha señalado con color naranja aquellos valores que superan los de referencia y, con color rojo, aquellos que sobrepasan los de intervención. Si bien el hecho de superar los valores de referencia no es indicativo claro de contaminación, ya que éstos están elaborados para una ubicación geográfica distinta a la del estudio, sí es un factor a tener en cuenta, sobre todo cuando se superan de forma notable, por lo que son de observar las altas concentraciones de Cinc que se presentan en los sondeos N1, S03 y S17.

Por lo que respecta a los casos del Cobre y el Plomo, los resultados son difíciles de valorar, por la gran variabilidad entre unos y otros análisis, que, de no ser debida a errores en los resultados, tendría su explicación en factores estacionales.

El Arsénico es el metal que con diferencia muestra un caso más grave de contaminación, superando los niveles de intervención de manera continua en los sondeos N1 y S13. Estos sondeos se encuentran ubicados en la zona de relleno antrópico constituido principalmente



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



por cenizas de pirita, por lo que sería esta la fuente de la contaminación por arsénico, así como por otros metales que también se detectan de manera notoria en estos puntos.

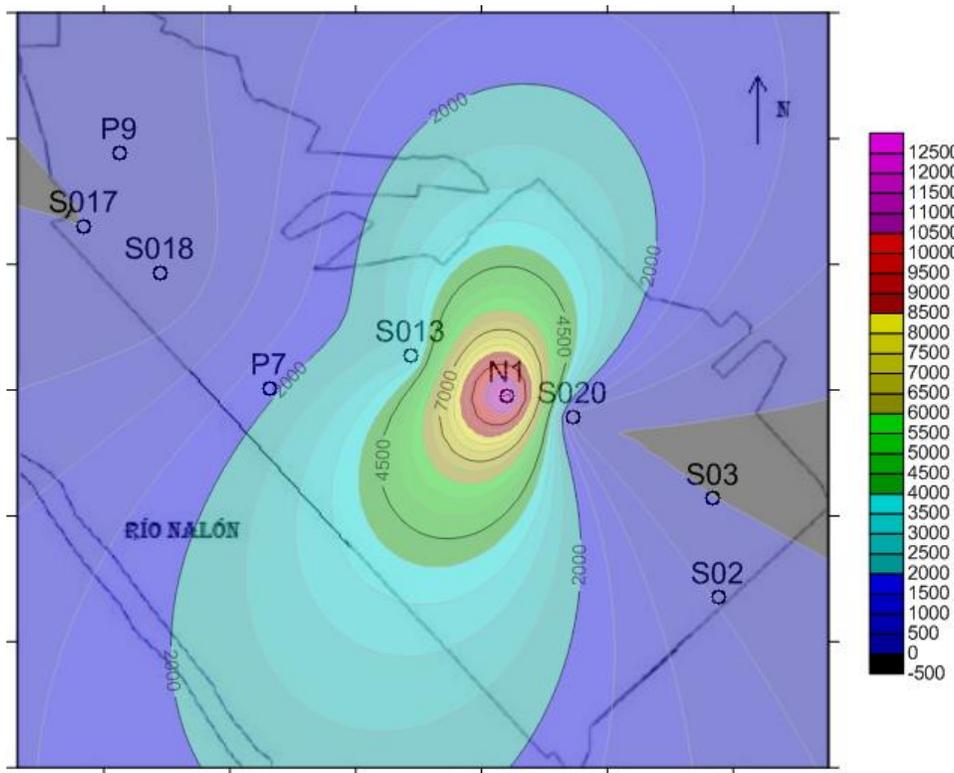
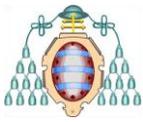


Figura 42.- Distribución de las concentraciones de arsénico (marzo 2016).

En el mapa anterior (Figura 42), a pesar de que la poca densidad de puntos de información no proporciona una distribución muy real, puede apreciarse como la concentración de arsénico se localiza en la zona de mayor predominancia de cenizas de pirita, y se va diluyendo según la dirección del flujo de agua subterránea.

Para valorar la influencia que puede tener el nivel de precipitación en la variación de concentraciones de los distintos metales a lo largo del año, se realiza un ensayo de inundación controlada en la zona de las cenizas de pirita, de manera que los resultados permitan determinar si el aporte de agua diluye las mencionadas concentraciones o si, por el contrario, influye en el aumento de las mismas.

El ensayo de inundación se realiza con una manguera que echa agua sobre el terreno con un caudal aproximado de 30 l/m, y en el sondeo N1 (que se sitúa en la zona de las cenizas de pirita en la que se lleva a cabo la inundación) se coloca una bomba peristáltica que bombea agua de su interior a la sonda con la que medir los parámetros físicos de manera continua.



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



Esta disposición se aprecia de manera más clara en la Figura 43.



Figura 43.- Distribución de los instrumentos en el ensayo de inundación.

El ensayo se prolonga durante casi cuatro horas, sin interrumpir el aporte de agua al terreno y tomando medidas de los parámetros físicos cada minuto. Los resultados, expuestos en el Anexo III, no muestran variaciones significativas ni tendencias para los casos de oxígeno disuelto o pH, pero sí en la medición de los parámetros conductividad eléctrica y potencial de reducción (ORP), tal y como se representa en la Figura 44.

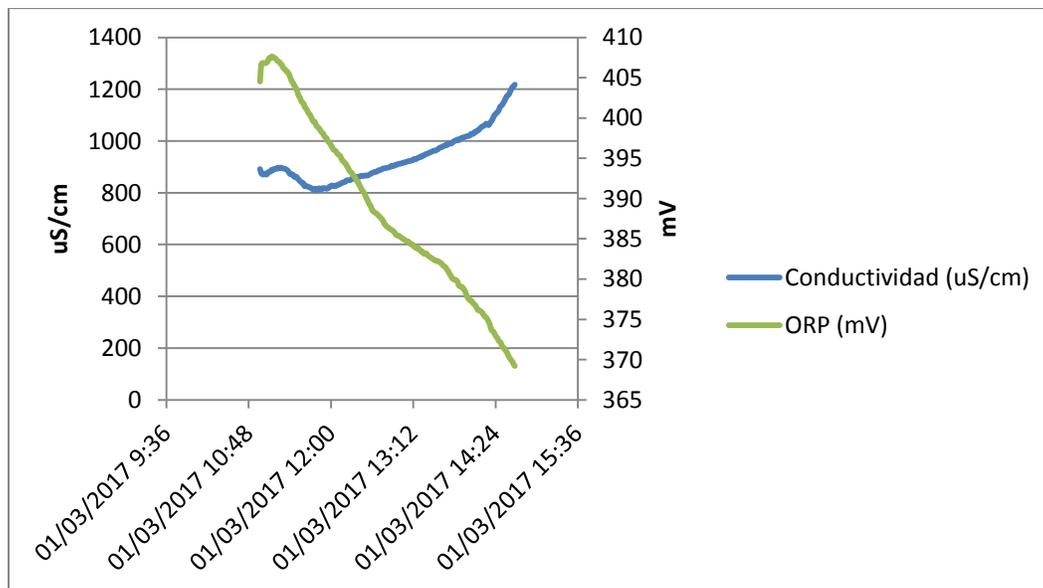
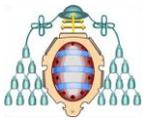


Figura 44.- Variaciones de conductividad eléctrica y ORP en el ensayo de inundación.



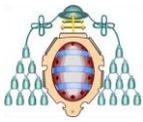
Aunque lo ideal sería disponer de mediciones de las concentraciones de metales y su variación a lo largo del ensayo, puede establecerse una correlación de éstas con los resultados de los que sí se disponen. En primer lugar, partiendo de la relación de la conductividad eléctrica con el total de sólidos disueltos, así como con el valor de pH, se traduce el aumento de la conductividad en la lixiviación de elementos contenidos en las cenizas de piritita y su paso al acuífero aluvial. Por otro lado, la disminución del potencial ORP indica una atenuación del carácter oxidante del agua subterránea, debida a la oxidación de los elementos contaminantes (la oxidación de dichos elementos conlleva la reducción del medio), que, de prolongarse más el ensayo, debería provocar una descenso del pH (acidificación del medio).

Se tiene, por tanto, como resultado del ensayo de inundación que el aporte de una gran cantidad de agua al acuífero en una de las zonas en las que presenta mayor contaminación no tiene como consecuencia una dilución de la misma, sino que se produce una lixiviación de elementos contenidos en las cenizas de piritita y su paso al acuífero. Esta situación es extrapolable al efecto de las condiciones climáticas sobre la calidad del agua subterránea (que posteriormente pasa al río Nalón), es decir, a mayores niveles de precipitación, se incrementaría la concentración de contaminantes en el acuífero, mientras que esta se vería reducida durante los períodos más secos.

9. TÉCNICAS DE CONTROL Y ATENUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN

El gran volumen de suelo contaminado que se presenta en Nitrastur presenta un reto en lo que concierne a su descontaminación, más aún cuando los ensayos sobre su tratamiento que se ha realizado (DEC, 2009) concluyen la inviabilidad de las técnicas de lavado de suelos por las bajas reducciones de contaminantes que se consiguen. En este marco, el control de la contaminación mediante su inmovilización se convierte en la opción con mejores perspectivas.

Trabajando con los mismos sondeos para los que se determinan los parámetros físicos en la campaña de muestreo (cuya distribución se representa en la Figura 45), se lleva a cabo un ensayo piloto de control de la contaminación mediante la inyección de nanopartículas de óxido de hierro. La idea de este método pasa por la creación de una barrera en el acuífero,



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



formada por las nanopartículas, que se sitúe por delante, según la dirección de flujo, del foco contaminante, de modo que la contaminación quedé inmovilizada por la misma y no se disemine afectando a más zonas.

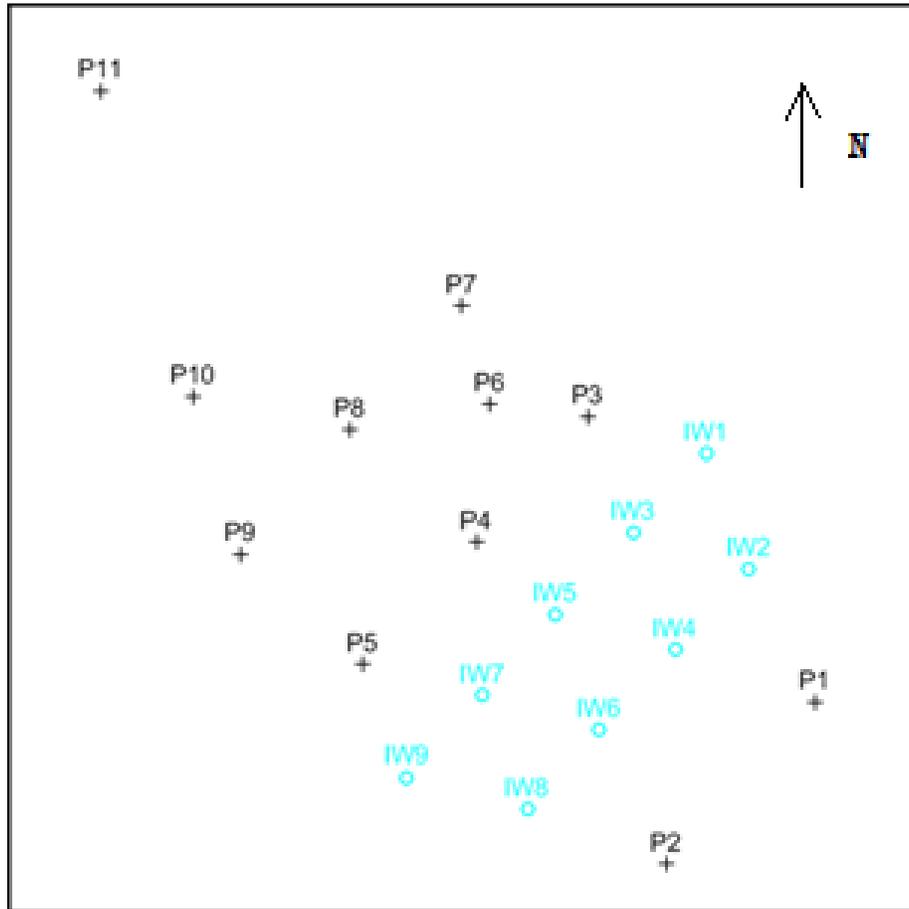
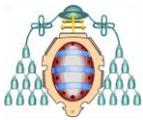


Figura 45.- Distribución de los sondeos en la zona del ensayo, siendo los IW los de inyección.

La inyección se lleva a cabo durante la segunda semana de mayo de 2017, en nueve sondeos situados de tal forma que conforman la barrera anteriormente comentada, y consiste en el bombeo a presión de la solución de nanopartículas dentro del sondeo, provocando su introducción dentro del aluvial entorno al sondeo. En la Figura 46 se observa el método de inyección en uno de los sondeos, y en la Figura 47, la maquinaria necesaria para realizarla.



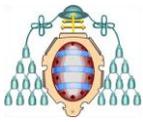
Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



Figura 46.- Inyección en el sondeo IW2.



Figura 47.- Maquinara para la inyección de las nanopartículas.



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado

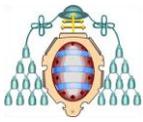


Como se muestra en la Tabla 6, durante los muestreos previos a la inyección, las aguas de los sondeos P3, P4, P6, P7, IW1, IW2, IW3 y IW4 son claramente ácidas con pH inferiores a 5 e incluso en algunos casos inferiores a 3; al mismo tiempo la conductividad eléctrica medida en estos sondeos muestra valores elevados. Habiendo establecido una correlación entre el pH y la conductividad eléctrica, y siendo ésta última indicadora de la concentración de sustancias disueltas, corresponde al análisis de la evolución de estos dos parámetros el valorar la efectividad del ensayo de inyección de nanopartículas.

Las nanopartículas de óxido de hierro tienen el fin de adsorber los elementos como el arsénico, que han pasado al acuífero por su lixiviación desde el suelo, y evitar por tanto su detección en los sondeos que se encuentran por delante. En la Tabla 17 se presentan los resultados de análisis de pH y conductividad eléctrica en las fechas posteriores a la realización de la inyección.

Tabla 17.- Resultados de los muestreos tras la inyección.

Sample ID	Basic parameters			
	17/05/2017		23/05/2017	
	pH	EC(μS/cm)	pH	EC(μS/cm)
P1	6,96	3437,64	7,01	2113,13
P2	6,32	1198,20	6,44	850,36
P3	5,61	7220,86	6,32	7974,11
P4	7,17	7790,40	6,51	7072,11
P5	7,56	6936,20	7,10	7073,14
P6	5,03	5134,89	5,35	5547,67
P7	4,06	3472,14	3,93	4827,00
P8	6,94	7177,18	6,30	6591,22
P9	7,75	11793,88	7,12	8387,50
P10	7,27	11885,44	7,30	8945,67
P11	6,55	1750,45	6,56	2971,25
IW1	6,96	14632,07	7,46	10825,10
IW2	7,22	16418,30	6,96	14143,23
IW3	7,37	16978,11	7,46	16344,25
IW4	7,03	11325,19	6,94	8759,79
IW5	7,89	14364,76	7,45	13476,36
IW6	9,30	14367,82	7,94	10117,13
IW7	9,19	13913,33	8,79	14053,22
IW8	10,24	17639,50	9,72	13188,50
IW9	9,62	16110,25	9,30	14355,38



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



En ambos muestreos se aprecia un aumento del pH en algunos de los puntos de inyección, como consecuencia de la adición de las nanopartículas, y la conductividad aumenta de forma generalizada por la presencia del óxido de hierro. Centrándose en la variación de pH en los sondeos de muestreo (los que no son de inyección), su variación se presenta en el siguiente gráfico (Figura 48), incluyendo también las medidas realizadas antes del ensayo y que se presentan en el apartado 8.2.3.1 (Tabla 6):

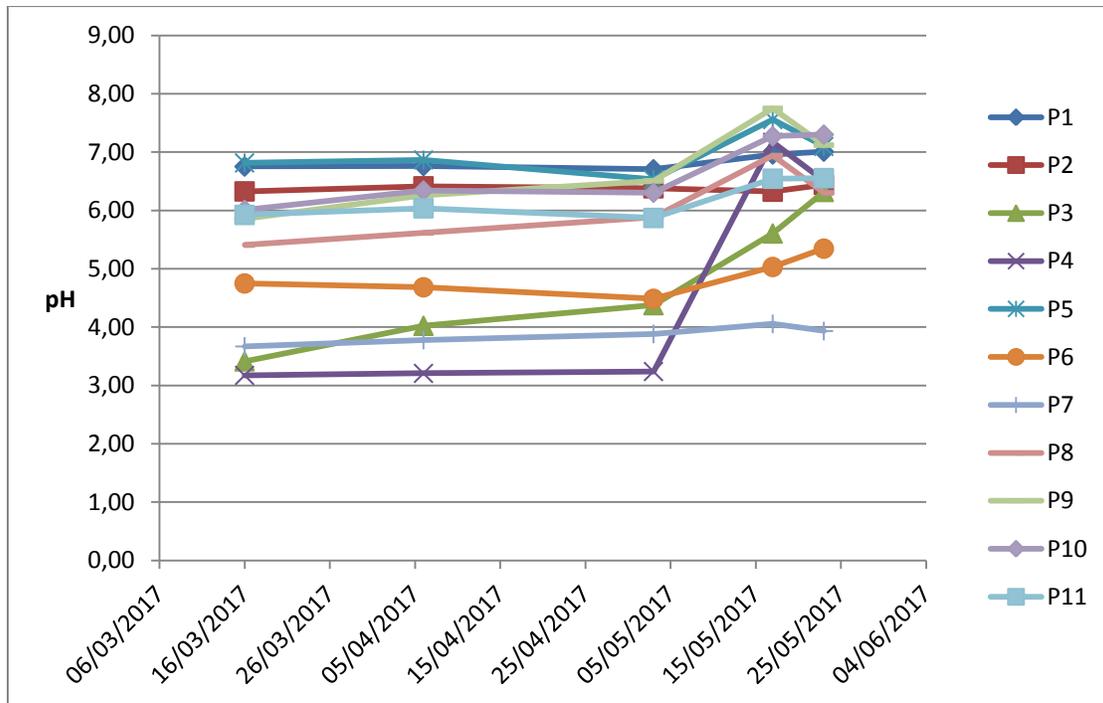
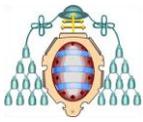


Figura 48.- Variación del pH con la inyección de las nanopartículas.

Se observa un descenso general de la acidez del agua, con la salvedad del caso del sondeo P7, ya que éste se sitúa de manera que el flujo de agua que lo atraviesa no se ve afectado totalmente por la barrera creada en la inyección. El resto de los puntos a priori más afectados por la contaminación (P3, P4 y P6) muestran una mejora notable en el aspecto de la acidez, si bien hay que tener en cuenta que ésta es únicamente un parámetro con el que valorar de forma indirecta la presencia de metales pesados, y se ve afectada por la inyección de las nanopartículas, por lo que para una correcta apreciación del éxito del ensayo se necesitaría, además de prolongar los muestreos en el tiempo, contar con los resultados del análisis multielemental de las muestras de agua.



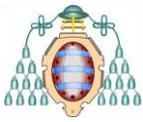
10. CONCLUSIONES

Las cenizas de pirita que forman parte del relleno antrópico sobre el que está construido el complejo industrial de Nitrastur se identifican como el principal foco de contaminación del acuífero aluvial subyacente, principalmente en lo relativo al arsénico, que se presenta como el elemento contaminante de más importancia, tanto por la amplitud con la que sus concentraciones superan los NGR como por su conocida toxicidad.

El arsénico, al igual que el resto de metales pesados presentes, se introduce en el acuífero por lixiviación desde el relleno antrópico. Esta lixiviación se produce lavando y desplazando cantidades notables de las sustancias solubles contenidas en las cenizas, ya que el aporte de agua no produce una dilución de la contaminación en el aluvial sino que da lugar a una mayor concentración de tales sustancias, por lo que el clima de Asturias, con abundantes precipitaciones, no es favorable a que los contaminantes permanezcan inmovilizados y, por el contrario, propicia su dispersión.

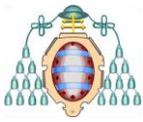
El acuífero aluvial está conectado con el río Nalón, principal cauce fluvial asturiano, de manera que aporta agua al mismo de manera constante, lo que, unido a su alta permeabilidad, podría estar provocando el paso de la contaminación al río y la consiguiente movilidad de la misma a gran velocidad. Sería conveniente, por lo tanto, establecer una monitorización del río Nalón que permitiera conocer los niveles de concentración de determinados elementos, como el arsénico, en sus aguas.

Ante la escasa efectividad que han demostrado procedimientos como el de lavado de suelos en proyectos anteriores, la inmovilización de la contaminación se presenta como una alternativa para paliar sus efectos. La inyección de nanopartículas de óxido de hierro en el aluvial a modo de barrera adsorbente de los contaminantes muestra en los primeros días una reducción de la acidez en el área bajo su influencia que puede indicar un funcionamiento favorable, si bien los resultados que se presentan en este trabajo no son concluyentes respecto a esto y se precisa analizar tanto la variación de los parámetros en el tiempo como las concentraciones de metales que se presenten.



11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aramburu, C. y Bastida, F. (1995). Geología de Asturias Ed. Trea.
- Confederación Hidrográfica del Cantábrico (2015). Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Occidental.
- DEC (2009). Proyecto de Ejecución de Obras de Instalación de Red Piezométrica y Realización de Ensayos de Tratamiento de Suelos en la Parcela Situada en la Avenida Pablo Picass nº 73, en la localidad de La Felguera (Langreo), Asturias. Deme Environmental Contractors NV. 279 pp.
- Eijkelkamp (2011). Laboratory permeameters. Operating instructions. 14 pp.
- Fernández, L.P. (1995). El Carbonífero. En *Geología de Asturias* (C. Aramburu y F. Bastida, eds.). Ed Trea, 63-80.
- Gutiérrez Claverol, M. y Luque Cabal, C. (1993). Recursos del subsuelo de Asturias.
- <http://www.aemet.es/>
- <http://www.aguaysig.com/>
- <https://www.asturias.es>
- <https://www.chcantabrico.es>
- <http://www.langreocultura.com/>
- <http://www.lne.es/>
- IGME: <http://info.igme.es/visor/>
- IGME (1973). Mapa Geológico de España (MAGNA 50), hoja 53 (Mieres).
- IGME (2008). Guía metodología para la determinación de los caudales ambientales. Capítulo de aguas subterráneas. Tomo II. 30 pp.
- INGE (2008). Caracterización hidrogeológica del aluvial del río Nalón y análisis de la influencia de las obras de soterramiento de las vías de FEVE en Langreo. Instrumentación Geotécnica y Estructural Ltd., Consejería de Medio Ambiente, Ordenación del Territorio e Infraestructuras, Gobierno del Principado de Asturias, Oviedo, Spain, 196 pp.
- Sánchez San Román, F. Javier (2011). Diagramas de Piper. Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, España. 4 pp. <http://hidrologia.usal.es/>



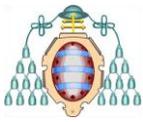
- Sánchez San Román, F. Javier (2011). Medidas puntuales de permeabilidad (“slug tests”). Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, España. 12 pp. <http://hidrologia.usal.es/>
- Schlumberger Water Services (2014). Manual de Diver. 27 pp.
- Vera, J.A. (ed.). Geología de España. Sociedad Geológica de España-Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 288-291.
- Winter, T.C., J.W. Harvey, O.L. Franke, and W.M. Alley (1998). Ground Water and Surface Water A Single Resource. US Geological Survey Publications. Circular 1139.

12. ANEXOS

ANEXO I

Medidas de nivel de columna de agua por los Divers

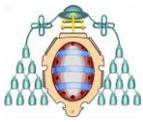
Fecha	Hora	Nivel s_11 (cm)	Nivel s_13 (cm)	Nivel s_20 (cm)
29.10.14	14:00:00.0	260,63	294,18	274,17
29.10.14	15:00:00.0	263,05	296,62	276,32
29.10.14	16:00:00.0	263,41	297,03	277,75
29.10.14	17:00:00.0	263,05	296,68	277,4
29.10.14	18:00:00.0	263,49	297,04	277,04
29.10.14	19:00:00.0	262,05	295,79	274,89
29.10.14	20:00:00.0	262,49	296,04	275,6
29.10.14	21:00:00.0	261,13	294,98	273,81
29.10.14	22:00:00.0	260,23	294,15	273,45
29.10.14	23:00:00.0	260,58	294,40	274,17
30.10.14	00:00:00.0	262,01	295,83	274,53
30.10.14	01:00:00.0	259,50	292,68	273,1
30.10.14	02:00:00.0	260,03	293,76	273,1
30.10.14	03:00:00.0	257,08	290,36	269,51
30.10.14	04:00:00.0	257,79	291,25	270,59
30.10.14	05:00:00.0	258,23	292,15	270,59
30.10.14	06:00:00.0	257,95	291,51	271,66
30.10.14	07:00:00.0	257,95	291,33	271,66
30.10.14	08:00:00.0	257,48	291,34	270,95
30.10.14	09:00:00.0	258,74	292,13	271,66
30.10.14	10:00:00.0	257,75	291,58	270,95
30.10.14	11:00:00.0	258,38	291,77	272,38



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



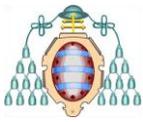
30.10.14	12:00:00.0	258,93	292,42	272,74
30.10.14	13:00:00.0	255,80	288,83	269,51
30.10.14	14:00:00.0	253,21	286,49	266,29
30.10.14	15:00:00.0	255,28	288,39	268,8
30.10.14	16:00:00.0	255,28	288,57	268,8
30.10.14	17:00:00.0	256,72	290,18	269,15
30.10.14	18:00:00.0	257,97	291,26	270,59
30.10.14	19:00:00.0	259,12	292,88	273,45
30.10.14	20:00:00.0	258,21	292,05	272,02
30.10.14	21:00:00.0	256,96	290,62	270,59
30.10.14	22:00:00.0	257,05	290,62	270,59
30.10.14	23:00:00.0	257,41	290,80	270,95
31.10.14	00:00:00.0	256,43	289,54	270,95
31.10.14	01:00:00.0	254,28	287,57	267,36
31.10.14	02:00:00.0	254,11	287,38	267
31.10.14	03:00:00.0	254,65	288,21	267,36
31.10.14	04:00:00.0	254,74	288,38	268,44
31.10.14	05:00:00.0	254,84	288,03	268,08
31.10.14	06:00:00.0	254,66	288,03	268,08
31.10.14	07:00:00.0	254,84	288,03	268,08
31.10.14	08:00:00.0	253,85	287,13	267,36
31.10.14	09:00:00.0	253,39	286,96	267,36
31.10.14	10:00:00.0	253,67	286,96	267,36
31.10.14	11:00:00.0	255,73	288,93	269,15
31.10.14	12:00:00.0	256,09	289,75	269,51
31.10.14	13:00:00.0	251,36	284,84	265,21
31.10.14	14:00:00.0	255,58	289,13	269,15
31.10.14	15:00:00.0	254,78	287,88	268,8
31.10.14	16:00:00.0	257,73	291,39	273,1
31.10.14	17:00:00.0	258,01	291,28	272,02
31.10.14	18:00:00.0	261,31	295,04	274,89
31.10.14	19:00:00.0	259,60	293,14	273,45
31.10.14	20:00:00.0	259,33	292,79	273,45
31.10.14	21:00:00.0	258,60	292,08	270,95
31.10.14	22:00:00.0	258,77	292,51	272,74
31.10.14	23:00:00.0	258,40	292,16	271,66
01.11.14	00:00:00.0	258,48	292,05	272,02
01.11.14	01:00:00.0	258,37	292,31	270,95
01.11.14	02:00:00.0	256,22	289,98	269,87
01.11.14	03:00:00.0	259,44	292,92	273,1
01.11.14	04:00:00.0	257,84	290,88	270,95
01.11.14	05:00:00.0	258,37	291,84	273,1



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



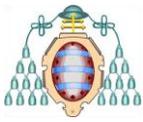
01.11.14	06:00:00.0	260,59	294,36	274,89
01.11.14	07:00:00.0	257,73	291,20	272,02
01.11.14	08:00:00.0	257,81	291,03	271,3
01.11.14	09:00:00.0	256,89	290,57	271,3
01.11.14	10:00:00.0	257,60	291,29	271,3
01.11.14	11:00:00.0	256,88	290,11	270,59
01.11.14	12:00:00.0	256,53	289,93	271,3
01.11.14	13:00:00.0	256,88	290,46	270,59
01.11.14	14:00:00.0	257,97	291,18	271,3
01.11.14	15:00:00.0	257,25	290,58	271,66
01.11.14	16:00:00.0	257,97	291,29	273,45
01.11.14	17:00:00.0	258,24	291,64	273,45
01.11.14	18:00:00.0	257,17	290,74	271,3
01.11.14	19:00:00.0	257,17	290,74	272,38
01.11.14	20:00:00.0	258,24	291,82	271,3
01.11.14	21:00:00.0	259,32	292,89	274,53
01.11.14	22:00:00.0	258,52	291,82	272,38
01.11.14	23:00:00.0	258,52	291,82	273,45
02.11.14	00:00:00.0	259,16	292,46	273,45
02.11.14	01:00:00.0	259,16	292,63	273,45
02.11.14	02:00:00.0	257,29	290,59	272,02
02.11.14	03:00:00.0	258,92	292,13	272,02
02.11.14	04:00:00.0	260,91	293,85	274,17
02.11.14	05:00:00.0	257,33	290,73	270,23
02.11.14	06:00:00.0	258,05	291,44	272,02
02.11.14	07:00:00.0	258,33	291,79	272,02
02.11.14	08:00:00.0	257,89	291,36	270,95
02.11.14	09:00:00.0	257,53	291,00	270,59
02.11.14	10:00:00.0	256,02	289,38	268,8
02.11.14	11:00:00.0	257,18	290,82	272,38
02.11.14	12:00:00.0	256,02	289,38	269,87
02.11.14	13:00:00.0	257,73	291,11	271,3
02.11.14	14:00:00.0	258,80	291,89	271,3
02.11.14	15:00:00.0	259,16	292,37	272,74
02.11.14	16:00:00.0	256,13	289,42	269,87
02.11.14	17:00:00.0	258,93	291,92	272,02
02.11.14	18:00:00.0	257,05	290,23	269,87
02.11.14	19:00:00.0	257,49	290,95	271,66
02.11.14	20:00:00.0	257,49	290,95	270,59
02.11.14	21:00:00.0	258,57	291,73	271,66
02.11.14	22:00:00.0	257,22	290,78	270,59
02.11.14	23:00:00.0	255,26	288,44	269,15



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua
en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



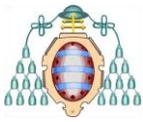
03.11.14	00:00:00.0	256,70	289,87	270,23
03.11.14	01:00:00.0	256,18	289,43	270,23
03.11.14	02:00:00.0	254,58	287,57	268,8
03.11.14	03:00:00.0	256,03	289,28	269,87
03.11.14	04:00:00.0	254,35	287,41	268,08
03.11.14	05:00:00.0	254,99	288,23	268,08
03.11.14	06:00:00.0	254,32	287,29	267,72
03.11.14	07:00:00.0	255,75	289,08	269,15
03.11.14	08:00:00.0	253,88	287,38	267,72
03.11.14	09:00:00.0	253,72	287,43	268,08
03.11.14	10:00:00.0	252,77	285,91	266,65
03.11.14	11:00:00.0	253,41	286,90	266,65
03.11.14	12:00:00.0	253,53	287,11	266,65
03.11.14	13:00:00.0	253,48	286,94	266,65
03.11.14	14:00:00.0	253,97	287,62	268,08
03.11.14	15:00:00.0	253,01	286,63	265,57
03.11.14	16:00:00.0	253,38	287,57	265,57
03.11.14	17:00:00.0	254,09	288,11	267,72
03.11.14	18:00:00.0	255,60	289,62	267,72
03.11.14	19:00:00.0	255,76	289,70	267,72
03.11.14	20:00:00.0	255,12	289,12	267,72
03.11.14	21:00:00.0	255,12	289,23	267,72
03.11.14	22:00:00.0	255,12	288,88	266,65
03.11.14	23:00:00.0	256,19	289,67	267,72
04.11.14	00:00:00.0	253,77	287,23	265,21
04.11.14	01:00:00.0	252,33	285,91	261,99
04.11.14	02:00:00.0	252,69	286,27	263,42
04.11.14	03:00:00.0	251,53	284,83	261,99
04.11.14	04:00:00.0	251,72	285,18	264,14
04.11.14	05:00:00.0	252,26	285,66	263,42
04.11.14	06:00:00.0	251,90	285,48	263,06
04.11.14	07:00:00.0	250,64	284,23	260,91
04.11.14	08:00:00.0	251,26	284,83	263,06
04.11.14	09:00:00.0	251,16	284,90	262,35
04.11.14	10:00:00.0	250,88	284,55	261,27
04.11.14	11:00:00.0	251,32	285,16	264,5
04.11.14	12:00:00.0	251,30	285,23	264,14
04.11.14	13:00:00.0	250,04	283,81	261,63
04.11.14	14:00:00.0	251,75	285,24	263,42
04.11.14	15:00:00.0	251,48	285,13	263,42
04.11.14	16:00:00.0	250,48	284,24	261,63
04.11.14	17:00:00.0	252,43	286,11	263,06



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



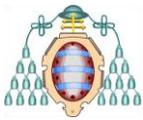
04.11.14	18:00:00.0	253,58	286,91	265,21
04.11.14	19:00:00.0	252,31	285,73	262,35
04.11.14	20:00:00.0	253,54	287,13	264,5
04.11.14	21:00:00.0	253,26	286,96	263,78
04.11.14	22:00:00.0	252,35	285,96	263,42
04.11.14	23:00:00.0	249,99	284,07	260,2
05.11.14	00:00:00.0	251,23	284,87	263,06
05.11.14	01:00:00.0	251,39	285,65	263,06
05.11.14	02:00:00.0	251,11	284,73	261,27
05.11.14	03:00:00.0	250,63	284,92	260,91
05.11.14	04:00:00.0	247,93	282,48	258,05
05.11.14	05:00:00.0	247,28	282,19	258,05
05.11.14	06:00:00.0	248,24	283,82	259,12
05.11.14	07:00:00.0	248,68	284,08	259,12
05.11.14	08:00:00.0	247,76	283,43	258,05
05.11.14	09:00:00.0	247,20	283,15	257,33
05.11.14	10:00:00.0	247,28	283,23	258,05
05.11.14	11:00:00.0	246,08	282,41	254,82
05.11.14	12:00:00.0	246,52	282,73	255,9
05.11.14	13:00:00.0	244,61	281,19	254,46
05.11.14	14:00:00.0	243,97	281,13	254,46
05.11.14	15:00:00.0	244,40	282,09	255,54
05.11.14	16:00:00.0	243,48	281,28	254,46
05.11.14	17:00:00.0	244,73	282,60	255,18
05.11.14	18:00:00.0	243,80	282,26	253,39
05.11.14	19:00:00.0	242,88	281,62	253,39
05.11.14	20:00:00.0	244,48	283,13	255,54
05.11.14	21:00:00.0	245,01	283,91	255,54
05.11.14	22:00:00.0	245,89	285,17	255,9
05.11.14	23:00:00.0	244,36	283,63	254,82
06.11.14	00:00:00.0	242,83	282,03	252,67
06.11.14	01:00:00.0	243,72	283,10	254,82
06.11.14	02:00:00.0	243,73	283,09	254,46
06.11.14	03:00:00.0	242,28	282,19	253,39
06.11.14	04:00:00.0	242,28	282,19	253,39
06.11.14	05:00:00.0	243,36	283,38	253,39
06.11.14	06:00:00.0	242,28	282,31	252,31
06.11.14	07:00:00.0	242,01	282,48	252,31
06.11.14	08:00:00.0	242,37	282,84	252,67
06.11.14	09:00:00.0	241,57	281,77	251,6
06.11.14	10:00:00.0	241,57	282,12	251,6
06.11.14	11:00:00.0	240,50	280,80	251,24



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



06.11.14	12:00:00.0	242,48	282,76	252,67
06.11.14	13:00:00.0	239,63	280,18	250,52
06.11.14	14:00:00.0	240,54	280,64	250,52
06.11.14	15:00:00.0	242,89	282,89	253,03
06.11.14	16:00:00.0	242,81	283,35	252,67
06.11.14	17:00:00.0	243,01	282,98	253,03
06.11.14	18:00:00.0	242,65	283,09	253,75
06.11.14	19:00:00.0	237,20	277,47	247,65
06.11.14	20:00:00.0	241,42	281,93	251,6
06.11.14	21:00:00.0	243,13	283,48	253,03
06.11.14	22:00:00.0	240,90	281,61	251,24
06.11.14	23:00:00.0	240,90	281,78	251,24
07.11.14	00:00:00.0	242,62	283,50	252,31
07.11.14	01:00:00.0	241,82	282,25	251,24
07.11.14	02:00:00.0	239,31	279,74	249,8
07.11.14	03:00:00.0	240,63	281,43	251,24
07.11.14	04:00:00.0	242,77	283,13	253,75
07.11.14	05:00:00.0	242,13	282,30	251,24
07.11.14	06:00:00.0	241,85	282,13	251,6
07.11.14	07:00:00.0	242,38	282,74	252,67
07.11.14	08:00:00.0	244,33	284,79	254,46
07.11.14	09:00:00.0	243,40	283,87	254,82
07.11.14	10:00:00.0	242,48	283,05	253,75
07.11.14	11:00:00.0	242,57	282,77	254,46
07.11.14	12:00:00.0	242,57	282,59	253,39
07.11.14	13:00:00.0	240,42	280,33	250,88
07.11.14	14:00:00.0	242,47	282,83	253,75
07.11.14	15:00:00.0	241,49	281,52	252,31
07.11.14	16:00:00.0	243,64	283,55	254,46
07.11.14	17:00:00.0	244,26	284,10	255,54
07.11.14	18:00:00.0	246,76	286,50	258,4
07.11.14	19:00:00.0	244,06	284,06	255,18
07.11.14	20:00:00.0	243,88	283,71	256,25
07.11.14	21:00:00.0	243,70	283,35	254,82
07.11.14	22:00:00.0	242,63	282,45	253,75
07.11.14	23:00:00.0	241,91	281,56	253,03
08.11.14	00:00:00.0	241,83	281,38	252,67
08.11.14	01:00:00.0	241,83	281,49	253,75
08.11.14	02:00:00.0	241,75	281,30	251,95
08.11.14	03:00:00.0	240,59	280,33	251,6
08.11.14	04:00:00.0	242,31	282,05	252,67
08.11.14	05:00:00.0	240,71	280,25	251,6



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado

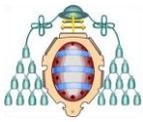


08.11.14	06:00:00.0	240,35	280,36	252,31
08.11.14	07:00:00.0	240,92	280,28	250,52
08.11.14	08:00:00.0	240,83	280,45	251,24
08.11.14	09:00:00.0	241,48	281,09	250,88
08.11.14	10:00:00.0	240,24	279,58	249,8
08.11.14	11:00:00.0	239,80	279,33	251,24
08.11.14	12:00:00.0	240,72	280,33	252,31
08.11.14	13:00:00.0	240,64	280,25	250,52
08.11.14	14:00:00.0	241,56	280,89	251,6
08.11.14	15:00:00.0	242,00	281,96	253,03
08.11.14	16:00:00.0	243,19	282,60	254,1
08.11.14	17:00:00.0	242,12	281,99	253,03

ANEXO II

Datos de precipitación horaria entre el 29/10/14 y el 08/10/14 en Sama de Langreo

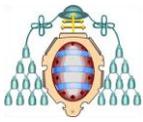
Fecha	Precipitación (mm)
29/10/2014 14:00	0,00
29/10/2014 15:00	0,00
29/10/2014 16:00	0,00
29/10/2014 17:00	0,00
29/10/2014 18:00	0,00
29/10/2014 19:00	0,00
29/10/2014 20:00	0,00
29/10/2014 21:00	0,00
29/10/2014 22:00	0,00
29/10/2014 23:00	0,00
30/10/2014 0:00	0,00
30/10/2014 1:00	0,00
30/10/2014 2:00	0,00
30/10/2014 3:00	0,00
30/10/2014 4:00	0,00
30/10/2014 5:00	0,00
30/10/2014 6:00	0,00
30/10/2014 7:00	0,00
30/10/2014 8:00	0,00
30/10/2014 9:00	0,00
30/10/2014 10:00	0,00
30/10/2014 11:00	0,00
30/10/2014 12:00	0,00
30/10/2014 13:00	0,00
30/10/2014 14:00	0,00
30/10/2014 15:00	0,00
30/10/2014 16:00	0,00



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



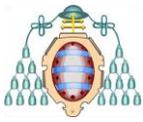
30/10/2014 17:00	0,00
30/10/2014 18:00	0,00
30/10/2014 19:00	0,00
30/10/2014 20:00	0,00
30/10/2014 21:00	0,00
30/10/2014 22:00	0,00
30/10/2014 23:00	0,00
31/10/2014 0:00	0,00
31/10/2014 1:00	0,00
31/10/2014 2:00	0,00
31/10/2014 3:00	0,00
31/10/2014 4:00	0,00
31/10/2014 5:00	0,00
31/10/2014 6:00	0,00
31/10/2014 7:00	0,00
31/10/2014 8:00	0,00
31/10/2014 9:00	0,00
31/10/2014 10:00	0,00
31/10/2014 11:00	0,00
31/10/2014 12:00	0,00
31/10/2014 13:00	0,00
31/10/2014 14:00	0,00
31/10/2014 15:00	0,00
31/10/2014 16:00	0,00
31/10/2014 17:00	0,00
31/10/2014 18:00	0,00
31/10/2014 19:00	0,00
31/10/2014 20:00	0,00
31/10/2014 21:00	0,00
31/10/2014 22:00	0,00
31/10/2014 23:00	0,00
01/11/2014 0:00	0,00
01/11/2014 1:00	0,00
01/11/2014 2:00	0,00
01/11/2014 3:00	0,00
01/11/2014 4:00	0,00
01/11/2014 5:00	0,00
01/11/2014 6:00	0,00
01/11/2014 7:00	0,00
01/11/2014 8:00	0,00
01/11/2014 9:00	0,00
01/11/2014 10:00	0,00
01/11/2014 11:00	0,00
01/11/2014 12:00	0,00
01/11/2014 13:00	0,00
01/11/2014 14:00	0,00
01/11/2014 15:00	0,00
01/11/2014 16:00	0,00
01/11/2014 17:00	0,00



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



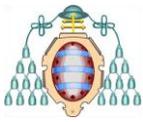
01/11/2014 18:00	0,00
01/11/2014 19:00	0,00
01/11/2014 20:00	0,00
01/11/2014 21:00	0,00
01/11/2014 22:00	0,00
01/11/2014 23:00	0,00
02/11/2014 0:00	0,00
02/11/2014 1:00	0,00
02/11/2014 2:00	0,00
02/11/2014 3:00	0,00
02/11/2014 4:00	0,00
02/11/2014 5:00	0,00
02/11/2014 6:00	0,00
02/11/2014 7:00	0,00
02/11/2014 8:00	0,00
02/11/2014 9:00	0,00
02/11/2014 10:00	0,00
02/11/2014 11:00	0,00
02/11/2014 12:00	1,20
02/11/2014 13:00	0,00
02/11/2014 14:00	0,00
02/11/2014 15:00	0,00
02/11/2014 16:00	1,50
02/11/2014 17:00	0,00
02/11/2014 18:00	0,00
02/11/2014 19:00	0,00
02/11/2014 20:00	0,00
02/11/2014 21:00	0,00
02/11/2014 22:00	0,00
02/11/2014 23:00	0,00
03/11/2014 0:00	0,00
03/11/2014 1:00	0,00
03/11/2014 2:00	0,00
03/11/2014 3:00	0,00
03/11/2014 4:00	0,00
03/11/2014 5:00	0,00
03/11/2014 6:00	0,00
03/11/2014 7:00	0,00
03/11/2014 8:00	0,00
03/11/2014 9:00	0,00
03/11/2014 10:00	0,20
03/11/2014 11:00	0,30
03/11/2014 12:00	0,60
03/11/2014 13:00	0,40
03/11/2014 14:00	0,00
03/11/2014 15:00	0,30
03/11/2014 16:00	0,20
03/11/2014 17:00	0,40
03/11/2014 18:00	6,10



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



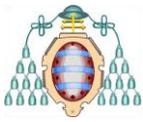
03/11/2014 19:00	4,70
03/11/2014 20:00	3,10
03/11/2014 21:00	0,40
03/11/2014 22:00	0,60
03/11/2014 23:00	0,30
04/11/2014 0:00	0,00
04/11/2014 1:00	0,00
04/11/2014 2:00	0,00
04/11/2014 3:00	0,00
04/11/2014 4:00	0,00
04/11/2014 5:00	0,00
04/11/2014 6:00	0,10
04/11/2014 7:00	0,00
04/11/2014 8:00	0,00
04/11/2014 9:00	0,00
04/11/2014 10:00	0,00
04/11/2014 11:00	0,10
04/11/2014 12:00	0,80
04/11/2014 13:00	1,00
04/11/2014 14:00	0,40
04/11/2014 15:00	0,30
04/11/2014 16:00	0,30
04/11/2014 17:00	1,10
04/11/2014 18:00	1,50
04/11/2014 19:00	0,20
04/11/2014 20:00	0,00
04/11/2014 21:00	0,00
04/11/2014 22:00	2,20
04/11/2014 23:00	3,50
05/11/2014 0:00	0,00
05/11/2014 1:00	0,50
05/11/2014 2:00	4,50
05/11/2014 3:00	1,50
05/11/2014 4:00	0,20
05/11/2014 5:00	0,50
05/11/2014 6:00	0,20
05/11/2014 7:00	0,40
05/11/2014 8:00	0,50
05/11/2014 9:00	0,30
05/11/2014 10:00	3,00
05/11/2014 11:00	1,20
05/11/2014 12:00	1,10
05/11/2014 13:00	4,00
05/11/2014 14:00	0,80
05/11/2014 15:00	0,00
05/11/2014 16:00	0,50
05/11/2014 17:00	0,50
05/11/2014 18:00	0,30
05/11/2014 19:00	1,30



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



05/11/2014 20:00	0,00
05/11/2014 21:00	0,00
05/11/2014 22:00	0,00
05/11/2014 23:00	0,30
06/11/2014 0:00	0,00
06/11/2014 1:00	0,00
06/11/2014 2:00	0,00
06/11/2014 3:00	0,00
06/11/2014 4:00	0,00
06/11/2014 5:00	0,00
06/11/2014 6:00	0,00
06/11/2014 7:00	0,00
06/11/2014 8:00	0,00
06/11/2014 9:00	0,00
06/11/2014 10:00	0,00
06/11/2014 11:00	0,00
06/11/2014 12:00	0,00
06/11/2014 13:00	0,00
06/11/2014 14:00	0,00
06/11/2014 15:00	0,00
06/11/2014 16:00	0,00
06/11/2014 17:00	0,00
06/11/2014 18:00	0,00
06/11/2014 19:00	0,00
06/11/2014 20:00	0,00
06/11/2014 21:00	0,00
06/11/2014 22:00	0,00
06/11/2014 23:00	0,00
07/11/2014 0:00	0,00
07/11/2014 1:00	0,00
07/11/2014 2:00	0,00
07/11/2014 3:00	0,00
07/11/2014 4:00	1,90
07/11/2014 5:00	0,10
07/11/2014 6:00	0,10
07/11/2014 7:00	0,00
07/11/2014 8:00	0,00
07/11/2014 9:00	0,00
07/11/2014 10:00	0,00
07/11/2014 11:00	0,00
07/11/2014 12:00	0,00
07/11/2014 13:00	0,00
07/11/2014 14:00	0,00
07/11/2014 15:00	0,00
07/11/2014 16:00	0,00
07/11/2014 17:00	0,00
07/11/2014 18:00	0,00
07/11/2014 19:00	0,00
07/11/2014 20:00	0,00



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado

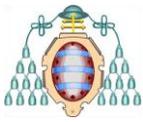


07/11/2014 21:00	0,00
07/11/2014 22:00	0,00
07/11/2014 23:00	0,00
08/11/2014 0:00	0,00
08/11/2014 1:00	0,00
08/11/2014 2:00	0,00
08/11/2014 3:00	0,00
08/11/2014 4:00	0,00
08/11/2014 5:00	0,00
08/11/2014 6:00	0,00
08/11/2014 7:00	0,00
08/11/2014 8:00	0,00
08/11/2014 9:00	0,00
08/11/2014 10:00	0,00
08/11/2014 11:00	0,00
08/11/2014 12:00	0,00
08/11/2014 13:00	0,00
08/11/2014 14:00	0,00
08/11/2014 15:00	0,00
08/11/2014 16:00	0,00
08/11/2014 17:00	0,00

ANEXO III

Resultados de la medición de parámetros físicos durante el ensayo de inundación

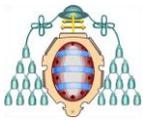
Timestamp	Specific Conductance (uS/cm)	Dissolved Oxygen (mg/L)	ORP_1 (mV)	pH_1 (Units)	Temperature (C)
01/03/2017 10:57	891	1,92	404,5	6,99	14
01/03/2017 10:58	876	1,35	406,6	7,01	14
01/03/2017 10:59	871	1,11	406,8	7,04	13,9
01/03/2017 11:00	870	0,87	406,8	7,05	13,8
01/03/2017 11:01	874	0,75	406,8	7,06	13,8
01/03/2017 11:02	870	0,69	406,8	7,07	13,8
01/03/2017 11:03	871	0,66	406,9	7,07	13,8
01/03/2017 11:04	878	0,64	407,1	7,07	13,7
01/03/2017 11:05	881	0,68	407,4	7,07	13,6
01/03/2017 11:06	881	0,69	407,4	7,07	13,6
01/03/2017 11:07	888	0,74	407,6	7,07	13,6
01/03/2017 11:08	886	0,8	407,6	7,07	13,7
01/03/2017 11:09	891	0,84	407,5	7,07	13,7
01/03/2017 11:10	892	0,94	407,4	7,07	13,8
01/03/2017 11:11	892	1,04	407,3	7,08	13,8



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua
en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



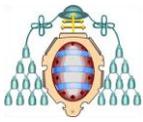
01/03/2017 11:12	896	1,16	407,1	7,08	13,7
01/03/2017 11:13	893	1,23	407	7,08	13,8
01/03/2017 11:14	897	1,3	406,9	7,08	13,8
01/03/2017 11:15	896	1,35	406,7	7,08	13,8
01/03/2017 11:16	896	1,44	406,6	7,08	13,8
01/03/2017 11:17	894	1,51	406,3	7,08	13,8
01/03/2017 11:18	893	1,51	406,1	7,08	13,8
01/03/2017 11:19	892	1,52	406	7,08	13,8
01/03/2017 11:20	889	1,6	405,8	7,09	13,8
01/03/2017 11:21	886	1,7	405,7	7,08	13,7
01/03/2017 11:22	880	1,76	405,5	7,08	13,8
01/03/2017 11:23	873	1,97	405,2	7,09	13,8
01/03/2017 11:24	873	2,01	404,8	7,09	13,8
01/03/2017 11:25	869	2,04	404,5	7,09	13,8
01/03/2017 11:26	869	2,08	404,3	7,09	13,7
01/03/2017 11:27	861	2,15	404	7,09	13,7
01/03/2017 11:28	861	2,19	403,8	7,09	13,8
01/03/2017 11:29	861	2,14	403,5	7,09	13,8
01/03/2017 11:30	854	2,22	403,1	7,09	13,8
01/03/2017 11:31	850	2,23	402,7	7,1	13,8
01/03/2017 11:32	844	2,39	402,5	7,1	13,8
01/03/2017 11:33	842	2,38	402,1	7,1	13,7
01/03/2017 11:34	836	2,52	401,9	7,1	13,7
01/03/2017 11:35	836	2,52	401,8	7,1	13,8
01/03/2017 11:36	825	2,64	401,4	7,1	13,7
01/03/2017 11:37	825	2,68	401,2	7,1	13,7
01/03/2017 11:38	825	2,65	401	7,1	13,7
01/03/2017 11:39	823	2,66	400,7	7,1	13,7
01/03/2017 11:40	821	2,67	400,5	7,1	13,7
01/03/2017 11:41	820	2,67	400,3	7,1	13,7
01/03/2017 11:42	816	2,71	400	7,1	13,7
01/03/2017 11:43	815	2,77	399,7	7,11	13,7
01/03/2017 11:44	811	2,82	399,5	7,11	13,7
01/03/2017 11:45	815	2,85	399,5	7,1	13,7
01/03/2017 11:46	815	2,72	399,1	7,1	13,7
01/03/2017 11:47	809	2,83	398,9	7,11	13,7
01/03/2017 11:48	815	2,75	398,8	7,11	13,8
01/03/2017 11:49	817	2,63	398,6	7,11	13,8
01/03/2017 11:50	814	2,7	398,4	7,11	13,7
01/03/2017 11:51	813	2,73	398,2	7,11	13,7
01/03/2017 11:52	818	2,71	398,1	7,11	13,8
01/03/2017 11:53	817	2,7	397,8	7,11	13,7



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua
en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



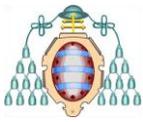
01/03/2017 11:54	817	2,71	397,6	7,11	13,7
01/03/2017 11:55	815	2,76	397,5	7,11	13,8
01/03/2017 11:56	816	2,75	397,2	7,11	13,8
01/03/2017 11:57	818	2,64	397	7,11	13,8
01/03/2017 11:58	824	2,57	396,9	7,11	13,8
01/03/2017 11:59	824	2,51	396,6	7,11	13,9
01/03/2017 12:00	828	2,52	396,4	7,11	13,9
01/03/2017 12:01	826	2,46	396,1	7,11	13,9
01/03/2017 12:02	827	2,42	396	7,11	13,9
01/03/2017 12:03	825	2,45	395,9	7,11	13,9
01/03/2017 12:04	829	2,42	395,7	7,11	13,9
01/03/2017 12:05	830	2,38	395,5	7,11	13,9
01/03/2017 12:06	831	2,32	395,4	7,11	13,9
01/03/2017 12:07	834	2,38	395,3	7,1	13,9
01/03/2017 12:08	835	2,31	395	7,1	13,9
01/03/2017 12:09	839	2,27	394,7	7,11	13,9
01/03/2017 12:10	840	2,19	394,6	7,11	14
01/03/2017 12:11	841	2,18	394,4	7,1	14
01/03/2017 12:12	844	2,13	394,3	7,1	14
01/03/2017 12:13	848	2,06	394	7,1	14
01/03/2017 12:14	848	2,06	393,8	7,1	14
01/03/2017 12:15	848	2,06	393,5	7,11	13,9
01/03/2017 12:16	849	2,07	393,3	7,11	13,9
01/03/2017 12:17	852	2,01	393,2	7,1	13,9
01/03/2017 12:18	856	1,94	393	7,1	13,9
01/03/2017 12:19	855	1,92	392,8	7,1	14
01/03/2017 12:20	860	1,9	392,6	7,1	14
01/03/2017 12:21	859	1,89	392,4	7,1	14
01/03/2017 12:22	861	1,93	392,1	7,1	14
01/03/2017 12:23	860	1,89	392	7,1	14,1
01/03/2017 12:24	862	1,88	391,6	7,1	14
01/03/2017 12:25	865	1,86	391,4	7,1	14
01/03/2017 12:26	864	1,87	391,1	7,1	14
01/03/2017 12:27	864	1,96	390,9	7,1	14
01/03/2017 12:28	866	1,91	390,7	7,1	14,1
01/03/2017 12:29	866	1,9	390,4	7,1	14
01/03/2017 12:30	866	1,96	390,1	7,1	14
01/03/2017 12:31	866	1,98	389,8	7,1	14
01/03/2017 12:32	868	1,96	389,5	7,1	14
01/03/2017 12:33	871	1,93	389,2	7,1	14
01/03/2017 12:34	873	1,87	389	7,1	14
01/03/2017 12:35	876	1,86	388,6	7,1	13,9



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua
en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



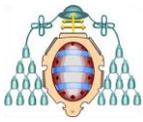
01/03/2017 12:36	878	1,87	388,4	7,1	13,8
01/03/2017 12:37	879	1,86	388,3	7,1	13,8
01/03/2017 12:38	881	1,84	388,2	7,1	13,7
01/03/2017 12:39	881	1,82	388,1	7,1	13,7
01/03/2017 12:40	884	1,82	388	7,1	13,7
01/03/2017 12:41	887	1,81	387,8	7,1	13,7
01/03/2017 12:42	887	1,78	387,7	7,1	13,6
01/03/2017 12:43	889	1,73	387,5	7,1	13,6
01/03/2017 12:44	892	1,69	387,4	7,1	13,6
01/03/2017 12:45	893	1,66	387,1	7,1	13,6
01/03/2017 12:46	895	1,66	386,8	7,1	13,6
01/03/2017 12:47	895	1,64	386,7	7,1	13,6
01/03/2017 12:48	896	1,63	386,5	7,1	13,6
01/03/2017 12:49	897	1,65	386,4	7,1	13,6
01/03/2017 12:50	898	1,65	386,3	7,1	13,6
01/03/2017 12:51	900	1,64	386,2	7,1	13,6
01/03/2017 12:52	904	1,65	386,1	7,1	13,5
01/03/2017 12:53	903	1,68	386	7,1	13,5
01/03/2017 12:54	903	1,66	385,9	7,1	13,5
01/03/2017 12:55	907	1,68	385,7	7,1	13,5
01/03/2017 12:56	908	1,7	385,5	7,1	13,5
01/03/2017 12:57	908	1,68	385,4	7,1	13,5
01/03/2017 12:58	911	1,68	385,4	7,1	13,5
01/03/2017 12:59	912	1,66	385,3	7,1	13,5
01/03/2017 13:00	912	1,66	385,2	7,1	13,5
01/03/2017 13:01	914	1,68	385,1	7,1	13,5
01/03/2017 13:02	915	1,7	385	7,1	13,4
01/03/2017 13:03	917	1,71	384,9	7,1	13,5
01/03/2017 13:04	917	1,68	384,8	7,1	13,5
01/03/2017 13:05	919	1,68	384,7	7,1	13,5
01/03/2017 13:06	921	1,66	384,7	7,1	13,4
01/03/2017 13:07	921	1,63	384,6	7,1	13,4
01/03/2017 13:08	923	1,62	384,5	7,1	13,5
01/03/2017 13:09	923	1,61	384,3	7,1	13,5
01/03/2017 13:10	925	1,61	384,3	7,1	13,5
01/03/2017 13:11	926	1,59	384,2	7,1	13,5
01/03/2017 13:12	931	1,59	384	7,1	13,5
01/03/2017 13:13	929	1,56	383,9	7,1	13,5
01/03/2017 13:14	931	1,57	383,8	7,1	13,4
01/03/2017 13:15	934	1,56	383,9	7,1	13,4
01/03/2017 13:16	936	1,57	383,7	7,1	13,5
01/03/2017 13:17	938	1,6	383,6	7,1	13,4



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua
en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



01/03/2017 13:18	938	1,59	383,4	7,1	13,4
01/03/2017 13:19	943	1,56	383,4	7,1	13,4
01/03/2017 13:20	943	1,56	383,2	7,1	13,4
01/03/2017 13:21	946	1,58	383,1	7,1	13,4
01/03/2017 13:22	949	1,58	383,2	7,1	13,4
01/03/2017 13:23	950	1,57	383,1	7,1	13,4
01/03/2017 13:24	952	1,56	382,9	7,1	13,5
01/03/2017 13:25	954	1,54	382,8	7,1	13,5
01/03/2017 13:26	956	1,54	382,7	7,1	13,4
01/03/2017 13:27	958	1,54	382,6	7,1	13,4
01/03/2017 13:28	960	1,52	382,5	7,1	13,5
01/03/2017 13:29	962	1,5	382,4	7,1	13,5
01/03/2017 13:30	962	1,5	382,3	7,1	13,4
01/03/2017 13:31	964	1,51	382,3	7,1	13,4
01/03/2017 13:32	966	1,5	382,2	7,1	13,4
01/03/2017 13:33	969	1,48	382,2	7,1	13,4
01/03/2017 13:34	973	1,49	382,1	7,1	13,4
01/03/2017 13:35	975	1,47	382	7,1	13,4
01/03/2017 13:36	976	1,47	381,9	7,1	13,4
01/03/2017 13:37	979	1,46	381,7	7,1	13,5
01/03/2017 13:38	981	1,45	381,6	7,1	13,4
01/03/2017 13:39	982	1,45	381,5	7,1	13,5
01/03/2017 13:40	986	1,43	381,3	7,1	13,5
01/03/2017 13:41	985	1,44	381,1	7,1	13,5
01/03/2017 13:42	989	1,46	380,9	7,1	13,5
01/03/2017 13:43	990	1,44	380,6	7,1	13,6
01/03/2017 13:44	990	1,43	380,4	7,1	13,7
01/03/2017 13:45	992	1,42	380,1	7,1	13,7
01/03/2017 13:46	997	1,42	380	7,1	13,6
01/03/2017 13:47	999	1,44	379,9	7,1	13,5
01/03/2017 13:48	1002	1,43	379,9	7,1	13,5
01/03/2017 13:49	1003	1,41	379,8	7,1	13,6
01/03/2017 13:50	1006	1,4	379,6	7,1	13,6
01/03/2017 13:51	1003	1,38	379,2	7,1	13,7
01/03/2017 13:52	1007	1,38	379,1	7,1	13,6
01/03/2017 13:53	1010	1,39	379	7,1	13,6
01/03/2017 13:54	1013	1,41	379	7,1	13,5
01/03/2017 13:55	1013	1,42	378,8	7,1	13,5
01/03/2017 13:56	1015	1,39	378,6	7,1	13,7
01/03/2017 13:57	1017	1,37	378,3	7,1	13,8
01/03/2017 13:58	1018	1,38	377,9	7,1	13,8
01/03/2017 13:59	1019	1,37	377,6	7,1	13,7



Identificación de los procesos hidrológicos que controlan la calidad del agua
en un acuífero aluvial situado bajo un suelo contaminado



01/03/2017 14:00	1020	1,37	377,5	7,1	13,7
01/03/2017 14:01	1024	1,36	377,3	7,1	13,7
01/03/2017 14:02	1028	1,42	377,3	7,1	13,6
01/03/2017 14:03	1027	1,41	377,1	7,1	13,7
01/03/2017 14:04	1029	1,42	376,9	7,1	13,6
01/03/2017 14:05	1035	1,41	376,8	7,1	13,6
01/03/2017 14:06	1035	1,41	376,6	7,1	13,7
01/03/2017 14:07	1040	1,41	376,3	7,1	13,8
01/03/2017 14:08	1041	1,42	376,1	7,1	13,7
01/03/2017 14:09	1046	1,44	376,1	7,1	13,6
01/03/2017 14:10	1050	1,45	376	7,1	13,6
01/03/2017 14:11	1055	1,47	375,9	7,1	13,6
01/03/2017 14:12	1057	1,49	375,7	7,1	13,6
01/03/2017 14:13	1059	1,52	375,5	7,1	13,6
01/03/2017 14:14	1063	1,54	375,3	7,1	13,7
01/03/2017 14:15	1067	1,56	375,2	7,1	13,5
01/03/2017 14:16	1065	1,54	375	7,1	13,6
01/03/2017 14:17	1061	1,51	374,7	7,09	13,8
01/03/2017 14:18	1067	1,53	374,4	7,1	13,8
01/03/2017 14:19	1074	1,55	373,9	7,1	13,8
01/03/2017 14:20	1080	1,6	373,6	7,1	13,8
01/03/2017 14:21	1089	1,64	373,5	7,1	13,8
01/03/2017 14:22	1098	1,66	373,3	7,1	13,8
01/03/2017 14:23	1104	1,74	373	7,1	13,8
01/03/2017 14:24	1108	1,8	372,8	7,1	13,8
01/03/2017 14:25	1113	1,83	372,6	7,1	13,8
01/03/2017 14:26	1119	1,86	372,3	7,1	13,8
01/03/2017 14:27	1131	1,91	372,2	7,09	13,8
01/03/2017 14:28	1136	1,97	372	7,09	13,8
01/03/2017 14:29	1140	1,99	371,6	7,09	13,8
01/03/2017 14:30	1148	2,06	371,5	7,09	13,8
01/03/2017 14:31	1155	2,13	371,3	7,09	13,8
01/03/2017 14:32	1165	2,21	371,1	7,09	13,8
01/03/2017 14:33	1173	2,26	370,9	7,09	13,8
01/03/2017 14:34	1177	2,35	370,6	7,09	13,7
01/03/2017 14:35	1182	2,35	370,3	7,09	13,8
01/03/2017 14:36	1192	2,43	370,1	7,09	13,8
01/03/2017 14:37	1201	2,54	369,9	7,09	13,8
01/03/2017 14:38	1209	2,56	369,7	7,09	13,8
01/03/2017 14:39	1212	2,6	369,4	7,09	13,8
01/03/2017 14:40	1218	2,7	369,2	7,09	13,8