



Universidad de Oviedo

TRABAJO DE FIN DE MASTER

MÁSTER OFICIAL EN RECURSOS GEOLÓGICOS E INGENIERÍA GEOLÓGICA

# **TÉCNICAS DE MEJORA DEL TERRENO: IMPERMEABILIZACIÓN DE LAS FILTRACIONES DEL LAGO DE ÁNDARA**



FERNANDO CASTILLO VILLOSLADA

JULIO 2013

D. Fernando Castillo Villoslada, autor del Trabajo Fin de Máster “Técnicas de mejora del terreno: Impermeabilización de las filtraciones del Lago de Ándara” certifica que constituye un trabajo original y solicita su presentación.

En Oviedo, a 10 de Julio de 2013

Fdo. Fernando Castillo Villoslada

D. Carlos López Fernández, Profesor Titular de Universidad, adscrito al Área de Conocimiento de Geodinámica Interna del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo, certifica que ha dirigido y revisado la memoria titulada “Técnicas de mejora del terreno: Impermeabilización de las filtraciones del Lago de Ándara”, correspondiente al Trabajo de Fin de Máster realizado por D. Fernando Castillo Villoslada, y autoriza su presentación

En Oviedo, a 10 de Julio de 2013

Fdo. Carlos López Fernández

## INDICE

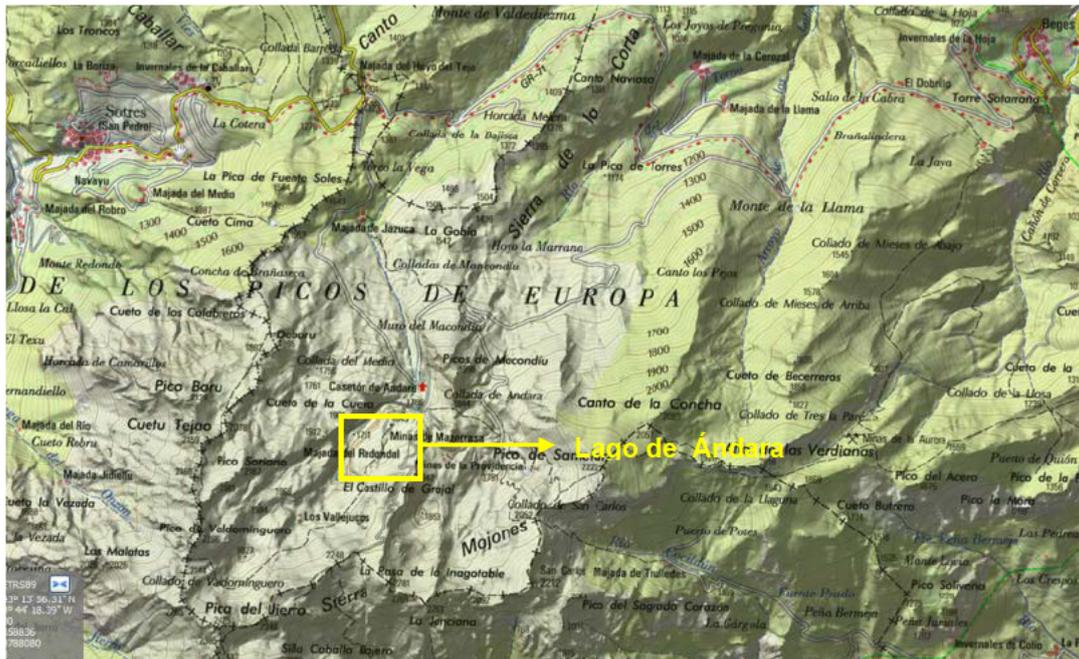
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	3
Situación geográfica.....	3
Antecedentes .....	4
Objetivos .....	8
2. CONTEXTO GEOLÓGICO .....	9
3. DEFINICIÓN DE LA ZONA A TRATAR .....	14
4. TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DEL TERRENO .....	16
Geomembranas.....	16
Geocompuestos de bentonita.....	18
Pantallas plásticas ( <i>Cutter Soil Mixing</i> ) .....	18
Deep Soil Mixing .....	21
Inyecciones.....	23
Jet Grouting.....	27
4. SOLUCIONES PROPUESTAS .....	32
5. PROYECTO DE IMPERMEABILIZACION.....	34
5.1. ACTUACIONES PREVIAS .....	34
5.2. CAMPAÑA DE INVESTIGACION .....	39
5.3. INYECCIONES DE IMPREGNACION.....	40
Equipos.....	40
Métodos de ejecución.....	42
Diseño del esquema de inyección .....	44
Tipo de lechada aplicada .....	45
Condicionantes logísticos y medioambientales.....	48
5.4. CONTROL Y VIGILANCIA.....	49
5.5. COSTE ECONÓMICO .....	51
6. CONCLUSIONES .....	54
7. REFERENCIAS .....	56

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La presente memoria constituye el Trabajo Fin de Máster del *Máster en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica* de la Universidad de Oviedo. En el mismo se han analizado las diferentes técnicas de tratamiento del terreno que potencialmente pudieran contribuir a la resolución del problema de pérdida de agua que se plantea en el entorno del antiguo lago de Ándara, situado en el macizo oriental de los Picos de Europa. En este estudio se han tenido en cuenta las particularidades de la zona, espacio protegido bajo la figura de Parque Nacional de los Picos de Europa, para sopesar las ventajas e inconvenientes que tendría el aplicar dichas técnicas para la solución del problema. Asimismo, se ha valorado la idoneidad de la aplicación de cada técnica en función de las características geológicas y geotécnicas de los materiales a tratar.

### **Situación geográfica**

La actual laguna de Ándara está situada en el macizo oriental de los Picos de Europa, habiendo constituido hasta su desecación, a principios del siglo XX, el tercer lago en extensión de los Picos de Europa, después de los lagos Enol y Ercina. Desde un punto de vista administrativo, se sitúa en la provincia de Cantabria, en la región de la Liébana entre la localidad de Sotres y el poblado de Bejes (Fig. 1). Más concretamente lo hace en el valle denominado *Majada del Redondal*, cuyas coordenadas geográficas son 43° 12' 38" N 4° 43' 7" O, que quedó integrado en el Parque Nacional de Picos de Europa en mayo de 1995. El acceso a este entorno se realiza por las antiguas pistas de acceso a las antiguas Minas de Mazarrasa.



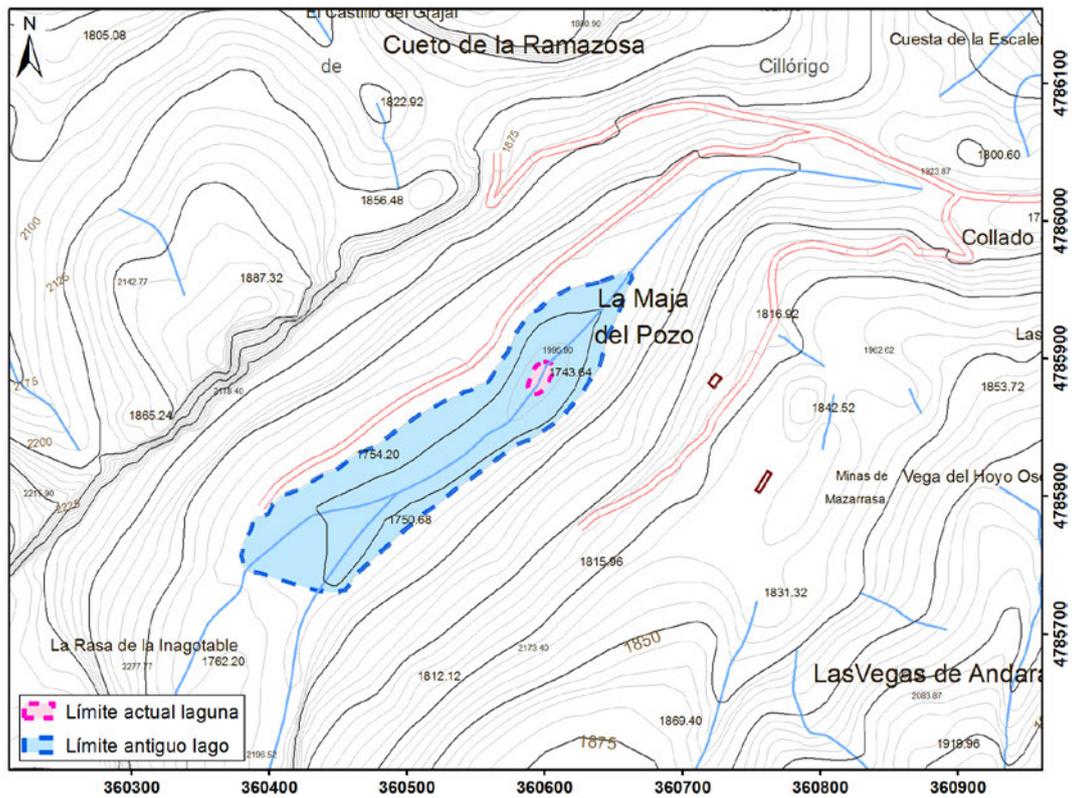
**Figura 1. Situación del Lago de Ándara dentro del macizo oriental de los Picos de Europa. Tomado del Sistema de información Iberpix del Instituto Geográfico Nacional.**

## Antecedentes

El antiguo lago de Ándara tenía unas dimensiones aproximadas de 325 m de largo y entre 45 y 75 m de ancho, con una superficie aproximada de 19.000 m<sup>2</sup>, estimadas a partir de los registros fotográficos y los mapas topográficos existentes (Figs. 2 y 3). Asimismo, se calcula que tendría una profundidad de unos 10 m según diversas referencias locales.



**Figura 2. Aspecto del lago en una fotografía tomada en torno al año 1910.**



**Figura 3. Mapa topográfico con la situación actual de la laguna y la aproximación anterior. Tomado de Farías et al., 2010.**

Entre los años 1889 y 1929 en la zona se realizaron actividades mineras para la extracción de Pb-Zn. Con toda probabilidad, a raíz de estas labores mineras, el lago de Andará se desecó hasta su situación actual (Fig. 4).



**Figura 4. Aspecto actual de la laguna de Ándara.**

Durante el verano de 2010 el Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo, a petición del Organismo Autónomo de Parques Nacionales, llevó a cabo un estudio en la zona para la determinación de la causa que produjo la desecación del lago. Dentro del mismo se realizaron diversos estudios geofísicos, tomografía eléctrica, cartografía geológica, etc., para intentar definir la zona en la que se produce la pérdida de agua que impide el llenado del lago.

En el marco de este trabajo, se realizaron tres campañas de recogida de datos geofísicos, una primera el 30 de junio de 2010, la siguiente el 29 de julio y otra el 2 de septiembre del mismo año. Se escogieron estas fechas para poder evaluar la evolución temporal de las filtraciones entre la época de mayor nivel de agua, tras unas importantes precipitaciones, y la época de mayor estiaje, y menores precipitaciones, al final del verano.

En dichas campañas geofísicas se realizaron diversos perfiles eléctricos (Fig. 5) y se probaron diferentes técnicas de tomografía eléctrica para evaluar su adecuación al caso.

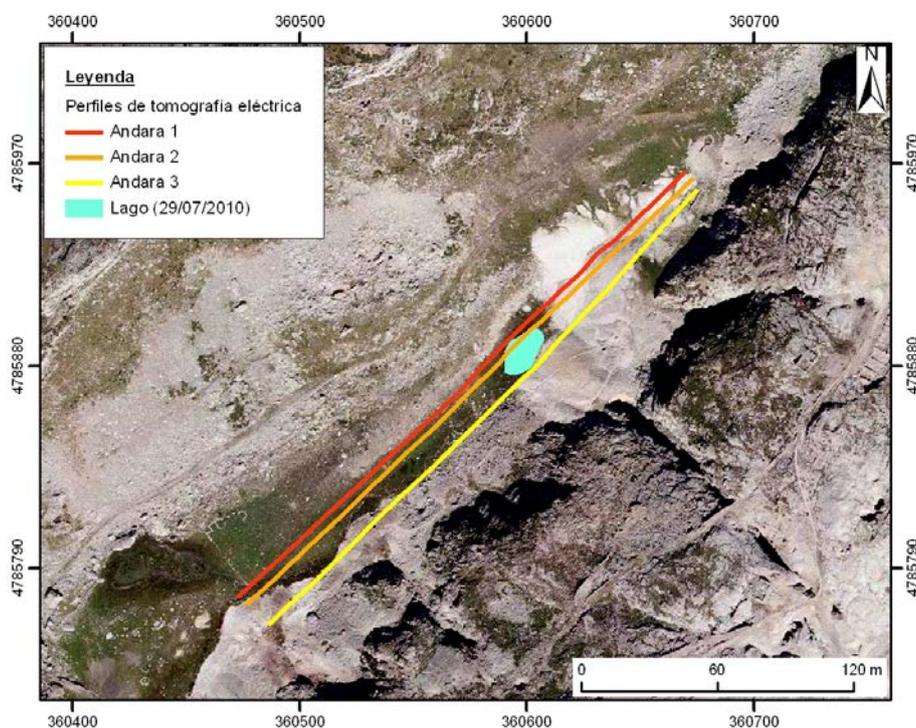


Figura 5. Localización de los perfiles de tomografía eléctrica. Tomado de Farias et al., 2010.

Los resultados de dichas campañas de reconocimiento concluyeron que las filtraciones que provocaron la desecación del lago se producen con toda probabilidad en el sector noreste de la laguna actual. En esta zona, el sello que produce la formación del lago (pizarras de la Formación Áliva) se habría fracturado debido a las labores mineras, y el agua se estará filtrando a través de ellas y de las rocas subyacentes (calizas de la Formación de los Picos de Europa), de naturaleza carbonatada y que funcionan como un acuífero de tipo karst. Esto se pudo observar en los diferentes perfiles realizados, donde las zonas de baja resistividad pueden correlacionarse con circulación de aguas (Fig. 6).

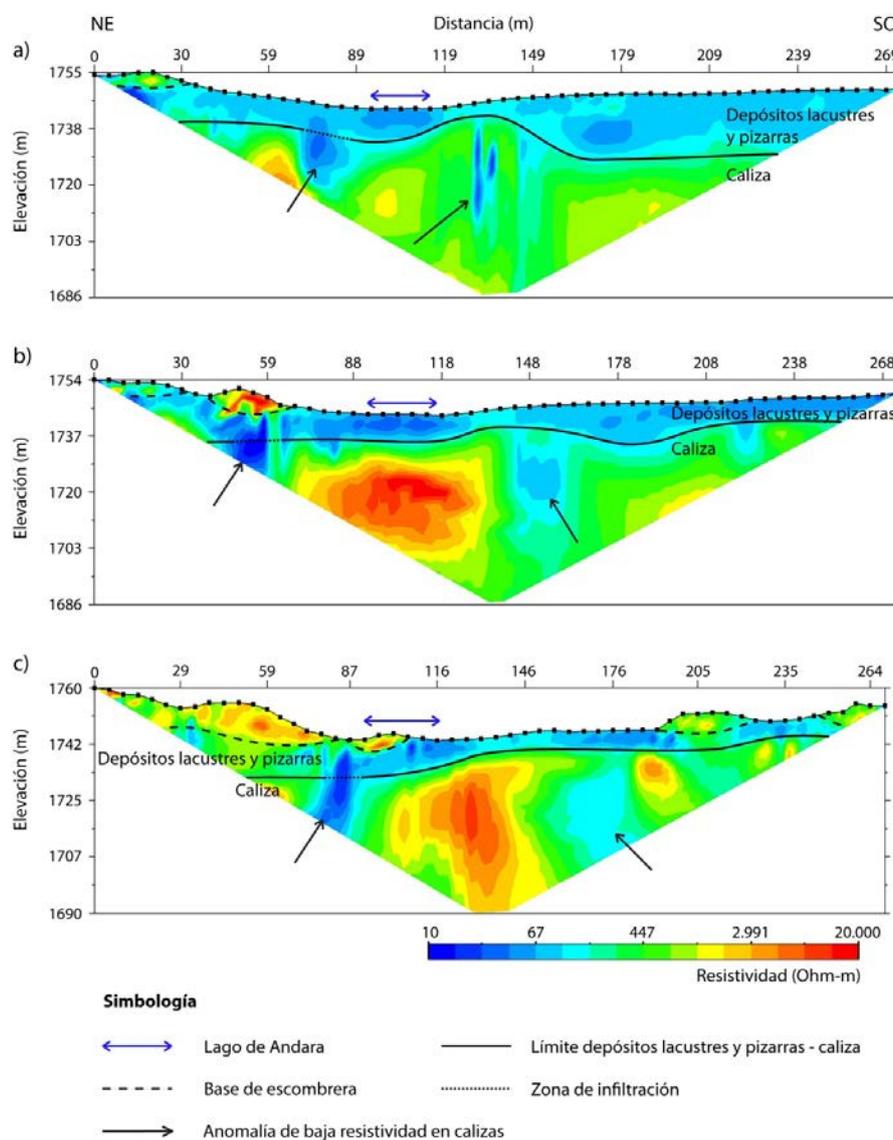


Figura 6. Perfiles eléctricos a) Ándara 1 b) Ándara 2 y c) Ándara 3 en los que se observa las anomalías detectadas. Tomado de Farias et al., 2010.

La representación de estas anomalías de resistividad sobre la ortofoto junto con la representación topográfica de las labores mineras permite observar como las anomalías se alinean con las mismas, por lo que muy posiblemente la filtración de agua se produce en dicho sector hacia las labores mineras (Fig. 7).

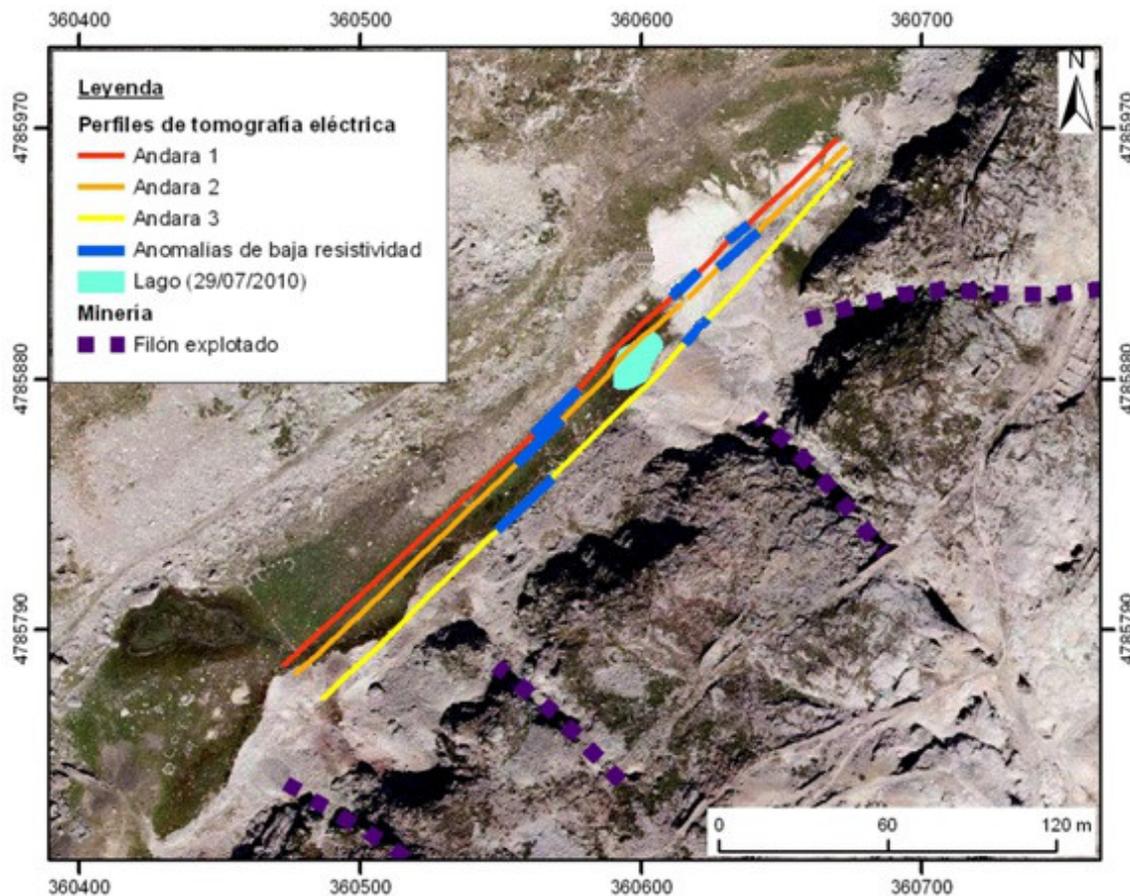


Figura 7. Representación de las anomalías eléctricas en planta, junto con la representación de los filones explotados. Tomado de Farias et al., 2010.

## Objetivos

El objetivo genérico del presente trabajo es el realizar un análisis exhaustivo de los diferentes métodos de mejora del terreno, que permita proponer una solución técnica al problema de filtraciones en la actual Laguna de Ándara. Para dicho análisis se ha realizado un análisis comparativo de las diferentes técnicas aplicables que existen actualmente, estudiando en detalle su idoneidad para la solución del problema planteado desde un punto de vista técnico, económico y, de modo especial, acorde con las normas de protección de este espacio.

## 2. CONTEXTO GEOLÓGICO

La zona de estudio se encuentra en el extremo oriental de la Cordillera Cantábrica, dentro de la Unidad de los Picos de Europa (Julivert, 1971a) (Fig. 8). Esta unidad limita al Norte y al Oeste con la unidad del Ponga-Cuera y al Sur con la unidad del Pisuerga-Carrión (Marquín y Adrados, 2004). Al Este, los materiales mesozoicos de la Cuenca Vasco-Cantábrica se sitúan discordantemente sobre las unidades anteriores.

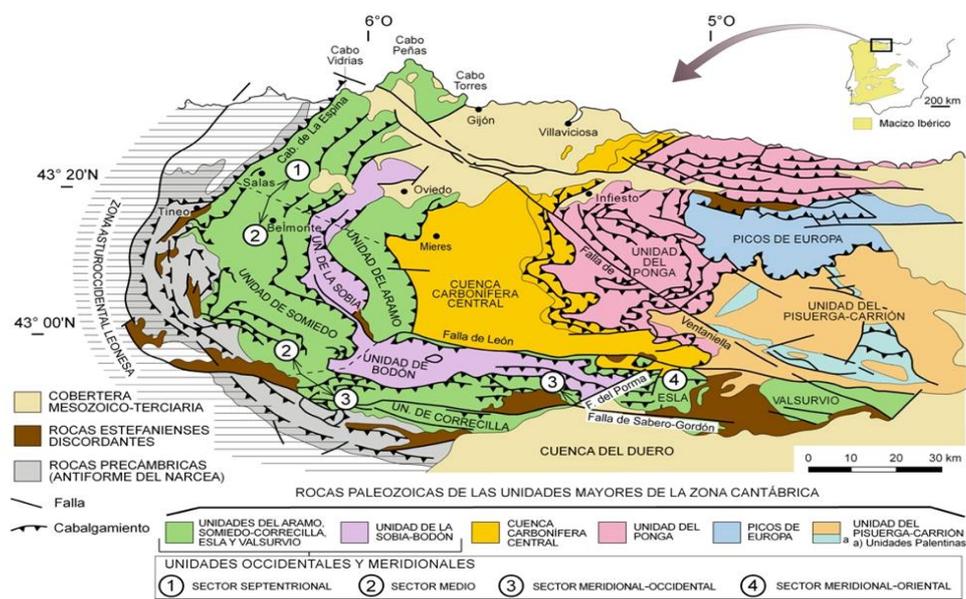


Figura 8. Esquema geológico de la zona Cantábrica. Basado en Julivert, 1971 y modificado por Pérez-Estaún et al., 1988.

Estructuralmente, la unidad de Picos de Europa está conformada por un conjunto de cabalgamientos con dirección E-O, que se emplazaron durante la Orogenia Varisca, produciendo la repetición de la secuencia Paleozoica. Estos cabalgamientos convergen hacia un cabalgamiento basal, poco inclinado, que tiene su despegue en la base de la secuencia Paleozoica (Marquín y Adrados, 2004). Cabalgando sobre este sistema imbricado se emplazó con anterioridad la Unidad del Cuera, que está constituida por materiales Cámbrico-Ordovícicos. Estos materiales están deformados por escamas de cabalgamientos con dirección NO-SE que, a su vez, son cortados posteriormente por los cabalgamientos menores del imbricado de Picos de Europa.

Asimismo, al oeste, esta Unidad se pone en contacto con el manto del Ponga siendo una zona tectónicamente complicada, donde los cabalgamientos de Picos de Europa se superponen tanto a las escamas del Ponga, como a los sedimentos sinorogénicos asociados a estas. Este contacto se presenta como una zona muy tectonizada con evidencias de cizalla dextra (Marquínez y Adrados, 2004).

Por último, los Picos de Europa se superponen tectónicamente hacia el sur sobre los materiales de la Unidad Pisuerga-Carrión los cuales representan la cuenca de antepaís del orógeno Varisco.

Posteriormente, durante la deformación Alpina, se desarrollaron fallas con dirección E-O, produciendo movimientos verticales, y fallas NO-SE, afectando a los cabalgamientos Variscos, que producen movimientos horizontales dextros (Marquínez y Adrados, 2004).

Según Marquínez (1989), en la unidad de Picos de Europa se diferencian tres sub-unidades, siendo de norte a sur las Láminas de Gamonedo-Panes, el Imbricado Principal de los Picos de Europa y las Láminas Frontales, tal y como se observa en el esquema realizado por Marquínez y Adrados (2000), representado en la figura 9.

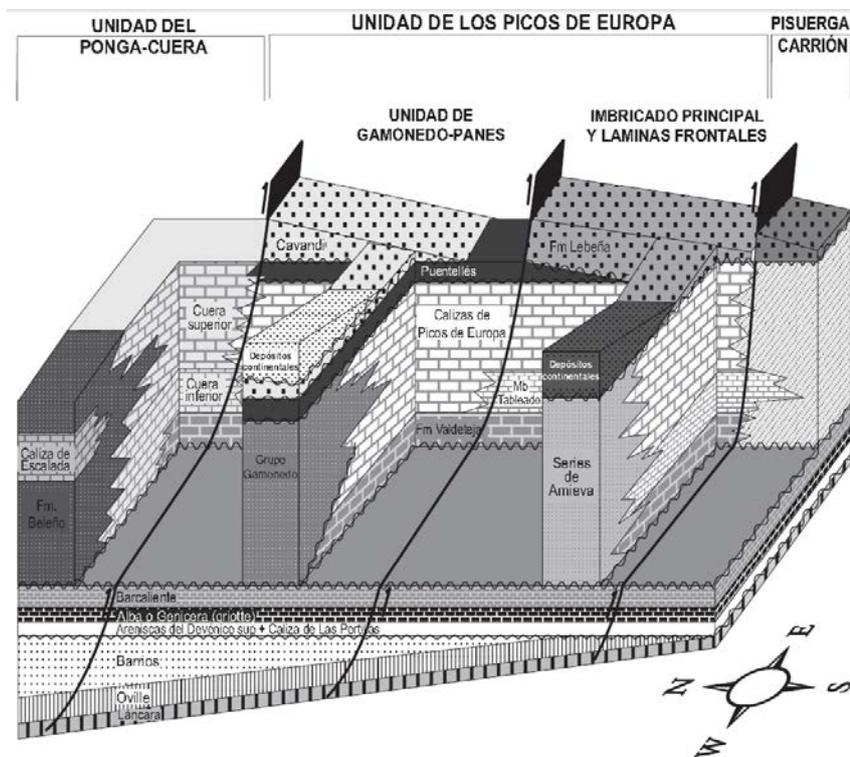


Figura 9. Esquema de las Unidades de Picos de Europa, Ponga-Cuera y Pisuerga-Carrión. Tomado de Marquínez y Adrados, 2000.

La zona del presente trabajo se emplaza sobre el Imbricado Principal de los Picos de Europa, que a su vez se compone de una serie de escamas de cabalgamiento que producen la repetición de la serie calcárea Carbonífera compuesta por las formaciones Alba, Barcaliente, Valdeteja, Picos de Europa y Puentellés (Marquínez y Adrados, 2004).

Durante el estudio realizado por Farias y otros en 2010 se realizó un mapa geológico de detalle del entorno del lago, que se reproduce en la figura 10.

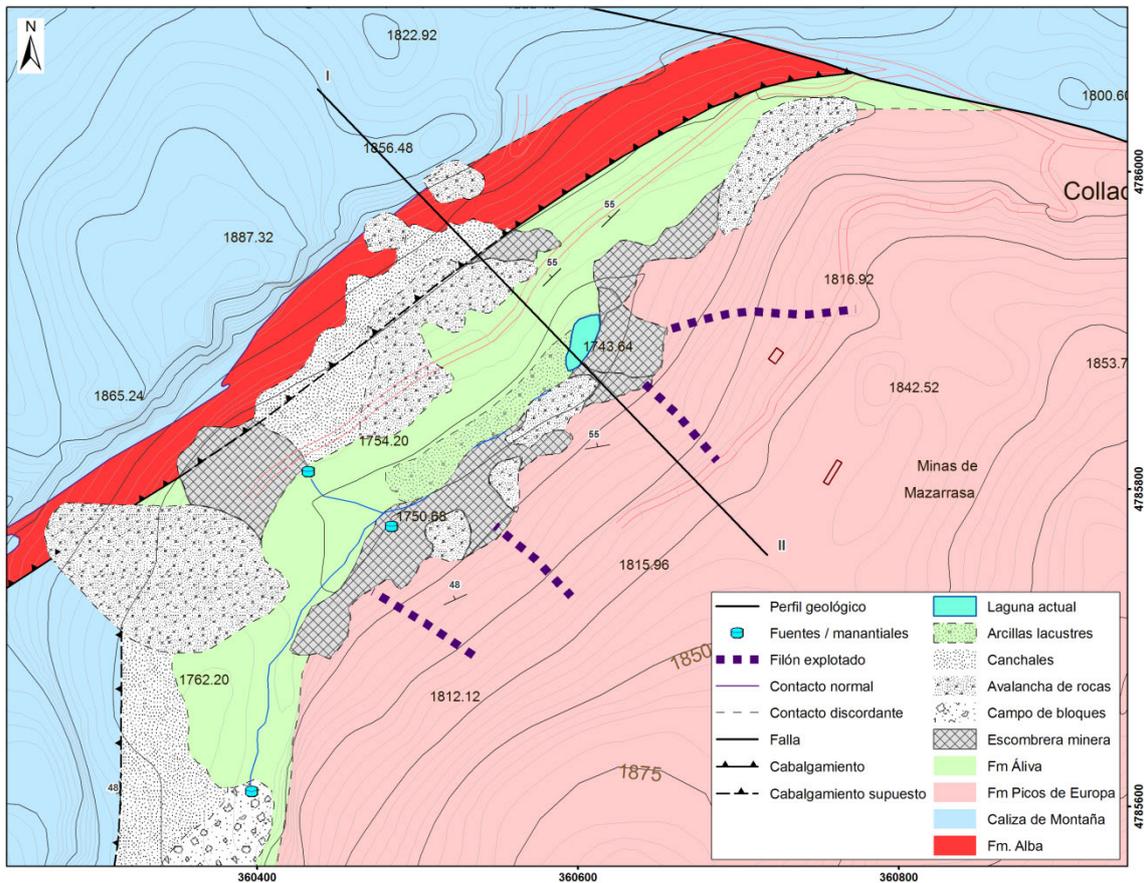
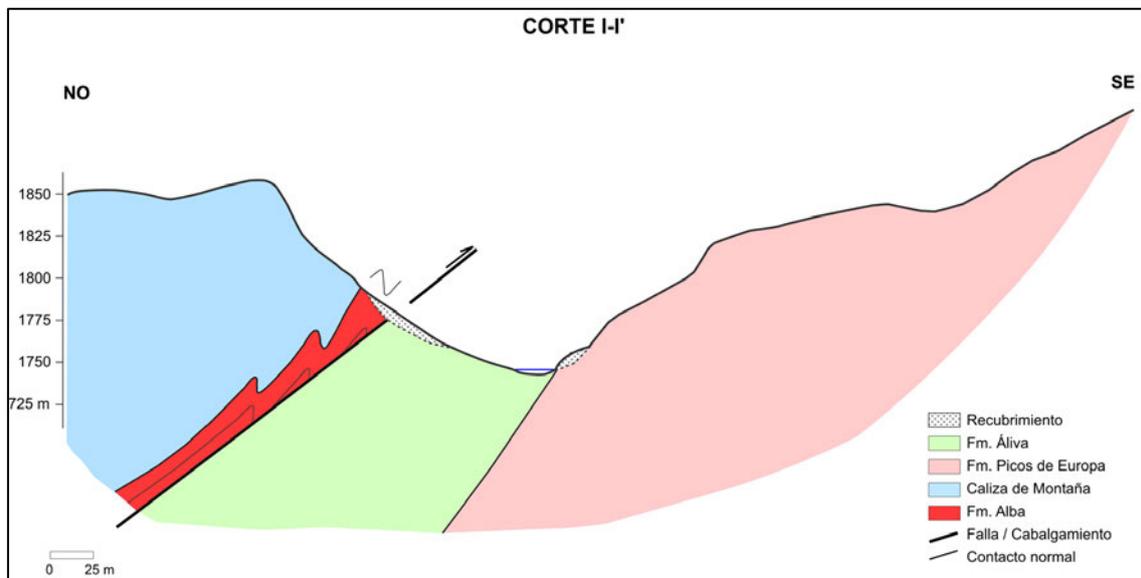


Figura10. Cartografía geológica de detalle del entorno del lago de Ándara. Tomado de Farias et al., 2010.

En la figura 10 se observa que la actual laguna se sitúa sobre un substrato de edad Carbonífero superior formado por pizarras, lutitas, delgados niveles de areniscas y bancos de calizas brechoideas y bioclásticas, que forman la Formación Áliva. Estas capas de pizarras tienen un rumbo SO-NE y buzamientos entre 50° y 90° al NO. Sobre estas pizarras y en el fondo del valle se depositaron los sedimentos arcillosos procedentes del antiguo lago los cuales poseen un espesor no mayor a 1,5 m. Estos materiales pizarrosos en la ladera sureste del valle se ponen en contacto estratigráfico discordante sobre las

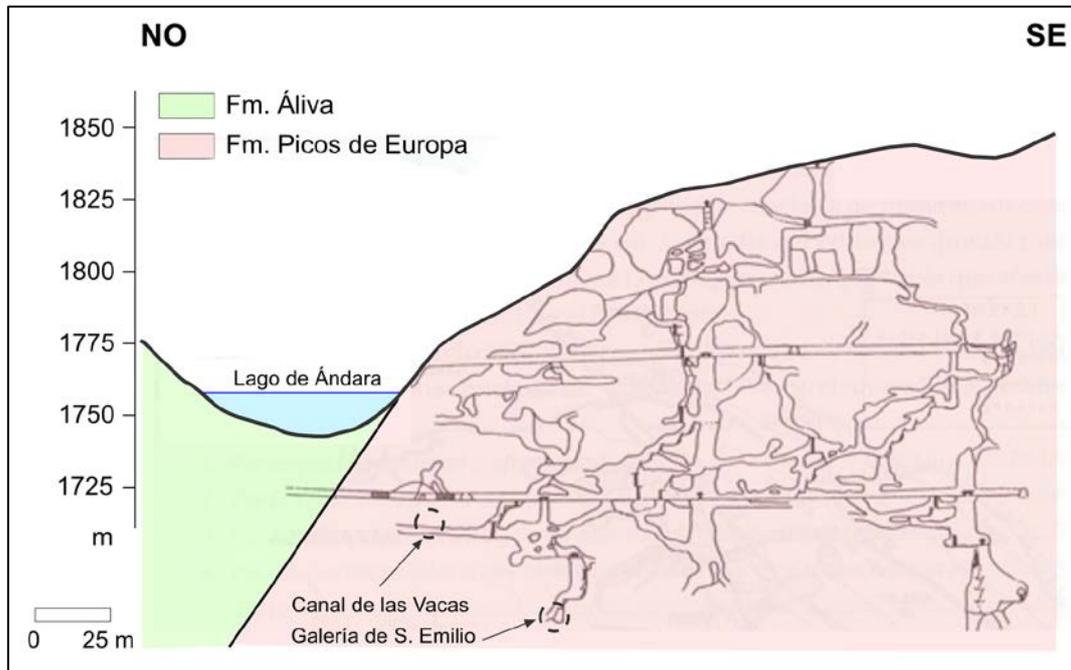
calizas de edad Carbonífero Superior de la Formación Picos de Europa. Estas capas carbonatadas buzcan igualmente hacia el NO lo que produce que se sitúen por debajo de las pizarras en la zona del valle como se puede observar en el corte geológico realizado por Farias y otros en 2010 (Fig. 11).



**Figura 11. Corte geológico realizado en el estudio de 2010. Tomado de Farias et al., 2010.**

En dichas calizas se emplazaron las mineralizaciones de Pb-Zn que fueron explotadas durante finales de siglo XIX y principios del XX. Además, como se observa en el corte geológico, en el otro flanco del valle una falla inversa coloca materiales más antiguos sobre dichas pizarras. Estos materiales corresponden a las formaciones Alba, Barcaliente y Valdeteja todas ellas de edad Carbonífero inferior.

Si en este corte geológico (Fig. 11) se representa una sección de las galerías mineras (Farias et al., 2010) se ve que las galerías más profundas llegaron a horadar las pizarras, momento en el que se abandonaban, justo sobre la vertical del lago y a una profundidad aproximada de 15 metros. Dichas galerías serían la causa, al haber fracturado el sello de pizarras, de que las aguas del lago se filtraran hacia las labores mineras (Fig. 12).



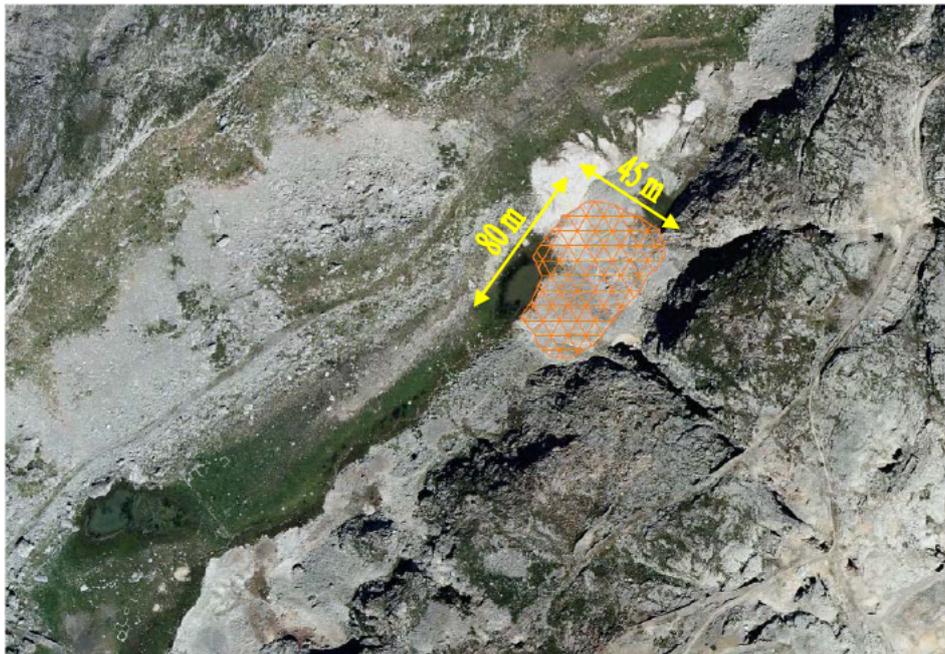
**Figura 12. Perfil geológico con superposición de una sección vertical de las labores mineras. Tomado de Farias et al., 2010.**

### 3. DEFINICIÓN DE LA ZONA A TRATAR

Con la información expuesta anteriormente se puede concluir que, en esa zona, el antiguo lago se sitúa sobre una formación pizarrosa (Fm. Áliva) que actuaba de sello que impedía que se filtrase el agua hacia la formación calcárea (Fm. Picos de Europa).

El método de excavación de las galerías mineras, mediante la utilización de explosivos, provoca que los materiales circundantes a las galerías se vean afectados por las ondas de propagación de los mismos y se provoque una fracturación y esponjamiento adicional de los materiales. Este hecho parece ser la principal causa de que la formación pizarrosa junto con la carbonatada ya no actué como sello y el agua acumulada se filtre por los niveles inferiores calcáreos hacia las galerías mineras, que actúan como sumideros.

Para minimizar la pérdida de agua se ha definido una potencial zona de actuación, delimitada a partir de los datos de resistividad aportados por los perfiles eléctricos realizados y considerando la zona donde confluyen las labores mineras. Esta zona se sitúa al noreste de la actual laguna, alcanzando unas dimensiones aproximadas de 80 m de largo por 45 m de ancho, ocupando unos 3.600 m<sup>2</sup> aproximadamente (Fig. 13).



**Figura 13. Proyección sobre ortofoto del límite aproximado de la zona a tratar.**

Para el diseño de la solución constructiva a aplicar en este problema, es necesario tener en cuenta lo siguiente:

1. Es necesario definir las características de la fracturación ocasionada por las voladuras mineras, especialmente su apertura y continuidad.
2. Los condicionantes medioambientales de la zona son especialmente importantes, existiendo numerosas restricciones como consecuencia de la figura de protección que afecta al entorno.
3. El lago se ubica en un entorno con importantes dificultades de acceso, lo que limita o impide el uso de maquinaria de gran entidad.
4. Las escombreras de las antiguas labores mineras se sitúan justo sobre la zona que presenta el problema de filtraciones, lo que puede acentuar la logística de la actuación.

#### 4. TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DEL TERRENO

Para la resolución del problema propuesto en este estudio se ha realizado un estudio comparativo entre las diferentes técnicas existentes actualmente, tratando de identificar la/s que potencialmente puedan resultar más idónea/s.

A continuación, se realiza una breve síntesis de las características generales de las técnicas existentes, destacando las ventajas y desventajas de su aplicación en el caso que nos ocupa.

##### **Geomembranas**

*Descripción:* las geomembranas son películas plásticas, generalmente de polietileno de alta densidad (PEAD), que se sitúan en el terreno para generar una separación física entre el terreno subyacente y la zona superior de la membrana. Esta técnica de impermeabilización es muy utilizada para la creación de balsas de decantación o de lixiviados en labores mineras o en la creación de reservorios de agua en la superficie (Fig. 14).



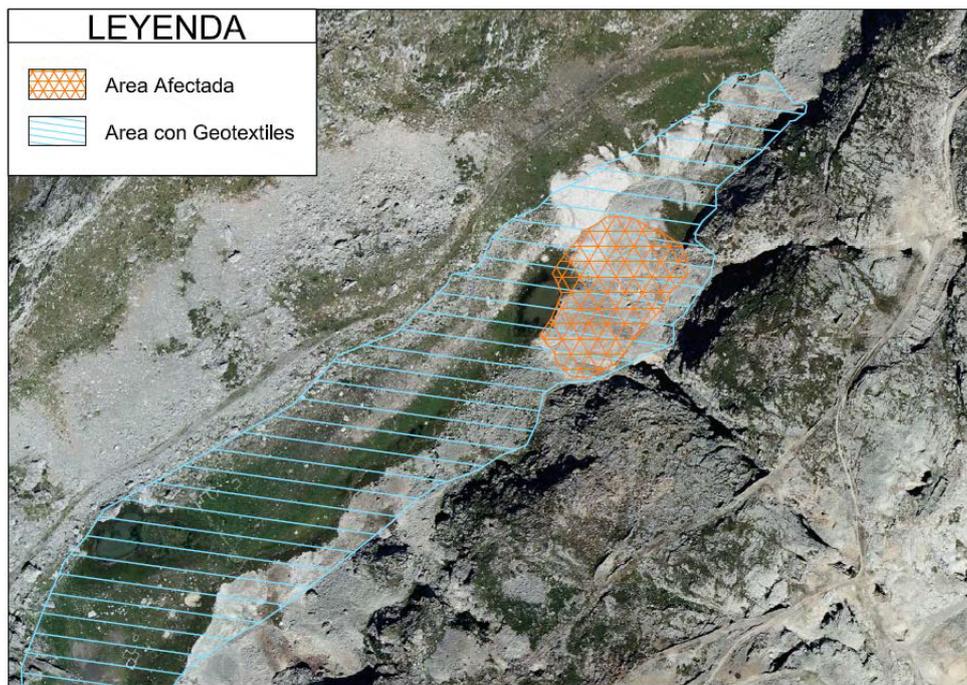
**Figura 14. Ejemplo de una balsa de regadío con geomembranas.**

En esta técnica, primero se ha de preparar el terreno en el que se va aplicar creando una sub-base mineral (arcillas) que protejan a la membrana de posibles

desgarros con las rocas de la superficie a tratar. Además, después de aplicar la membrana esta se puede recubrir con gravilla o arcillas para hacer una reconstrucción paisajística y que dicha lamina no se perciba desde el exterior.

*Ventajas:* dentro de las ventajas de esta técnica es su reducido coste, la no necesidad de maquinaria específica y su fácil instalación.

*Desventajas:* dentro de los inconvenientes de esta técnica en este caso particular es que el tratamiento no se restringiría solamente a la zona afectada, sino que, para la posible contención del lago, habría que instalar la lámina en toda la superficie del mismo, siendo necesaria una reconstrucción de todo el lago (Fig. 15). Esto, teniendo en cuenta que la zona se encuentra en un espacio protegido, supondría una intervención excesiva, además de afectar al funcionamiento hidrogeológico general del valle.



**Figura 15. Representación sobre ortofoto de la posible zona a recubrir con geotextiles.**

## Geocompuestos de bentonita

*Descripción:* los geocompuestos de bentonita son parecidos a las geomembranas descritas anteriormente. Se trata de dos capas de geotextiles de polipropileno entretejidas entre ellas entre las cuales se dispone de una capa granular de bentonita sódica. Esta bentonita sódica se hidrata cuando entra en contacto con el agua y se expande formando un sello que impide que el agua atraviese la lámina (Fig. 16).



Figura 16. Ejemplo de balsa creada con geocompuestos de bentonita.

*Ventajas:* las ventajas con respecto al método anterior son que tienen una alta resistencia ante procesos de congelación/descongelación, mejor estabilidad en pendientes, no requieren soldadura y además los posibles desgarros producidos por el terreno son reparados por la expansión de la bentonita.

*Desventajas:* tiene las mismas que la técnica anteriormente descrita.

## Pantallas plásticas (*Cutter Soil Mixing*)

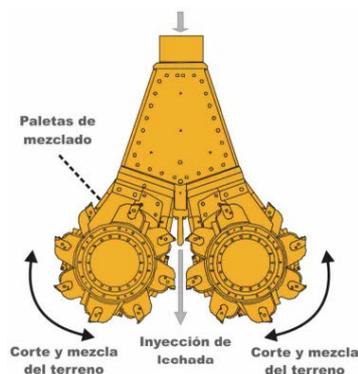
*Descripción:* esta técnica de mejora del terreno se usa para generar pantallas impermeabilizantes verticales mediante el uso de hidrofresas. La técnica consiste en ir excavando el terreno en paneles verticales mediante la utilización de una cabeza cortadora (hidrofresa) suspendida de un brazo grúa articulado. Dicha cabeza cortadora

posee dos elementos cortantes giratorios provistos de dientes de cortes; éstos giran en direcciones opuestas facilitando así la expulsión del material excavado (Fig. 17).



**Figura 17. Imagen de los cabezales de corte de la hidrofresa. Tomado de Terra-Bauer.**

A su vez la cabeza cortante posee un inyector, en la parte central entre las dos ruedas cortantes, por el cual se inyecta una mezcla de bentonita-cemento. Dicha mezcla gracias al movimiento rotatorio y de la acción de los dientes primero y de unas paletas mezcladoras en segundo lugar se amalgama con los detritos del terreno formando un material nuevo. Tras el fraguado del cemento se obtiene una pantalla impermeable (Fig. 18).

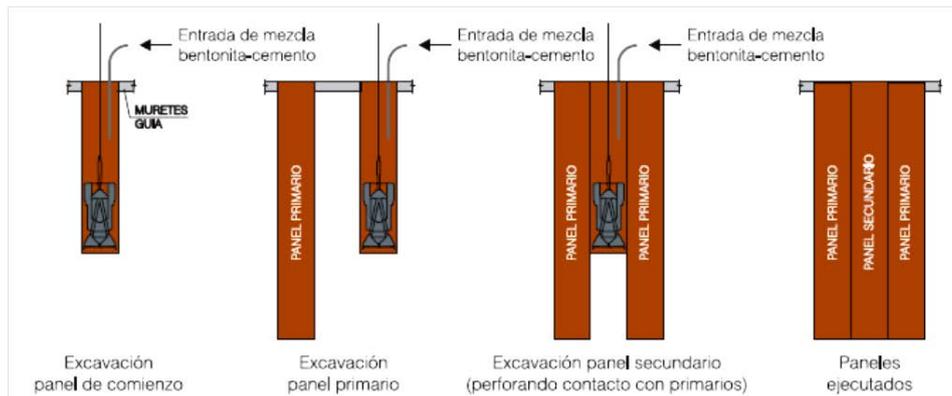


**Figura 18. Esquema de funcionamiento de cabezal cortante. Tomado de Terra-Bauer.**

Existen dos formas en la ejecución y la utilización de una u otra viene dada principalmente por la profundidad de las pantallas a realizar. Así, en pantallas poco profundas de menos de 20 m se utiliza la ejecución en una fase y en las más profundas en dos fases. La realización en una única fase consiste en inyectar la solución de bentonita-cemento según se va triturando el terreno. Este sistema se utiliza cuando los tiempos de perforación son cortos, ya que el cemento podría fraguar durante la excavación y provocar la no extracción de la unidad de corte.

En el sistema en dos fases, inicialmente, se excava el panel hasta la cota de diseño y, posteriormente, durante el ascenso de la hidrofresa se inyecta la mezcla de bentonita y cemento mezclándose con el terreno y generándose la pantalla.

Para la ejecución de muros continuos (Fig. 19), la construcción se ha dividido en paneles primarios y módulos secundarios, que se solapan con los anteriores mediante juntas frescas si se realizan cuando los paneles primarios aún no han fraguado o con solapes duros si se realizan cuando los primarios ya han endurecido.



**Figura 19. Esquema de ejecución de la pantalla.**

*Ventajas:* la principal ventaja es la utilización del propio terreno natural como material de la propia pantalla, por lo que se generan pocos residuos que tener que gestionar y trasladar en el entorno del parque natural.

El cabezal de corte tiene la capacidad de corte necesaria para atravesar tanto las pizarras como las calizas, y es muy efectiva produciendo muros de muy baja permeabilidad ( $< 10^{-6}$  cm/s).

*Desventajas:* dentro de las desventajas de esta técnica encontramos que los equipos necesarios para su realización son voluminosos, además la posible solución sería la construcción de un muro vertical en el contacto entre las pizarras y las capas de calizas y, a ser posible, por encima de la cota máxima de llenado del lago (Fig. 20), pero como las capas de calizas no están verticales no se puede garantizar que el sello en las mismas sea efectivo.

Asimismo, al situarse el contacto de las pizarras y las calizas bajo las antiguas escombreras sería necesario retirarlas para poder ejecutar el muro.

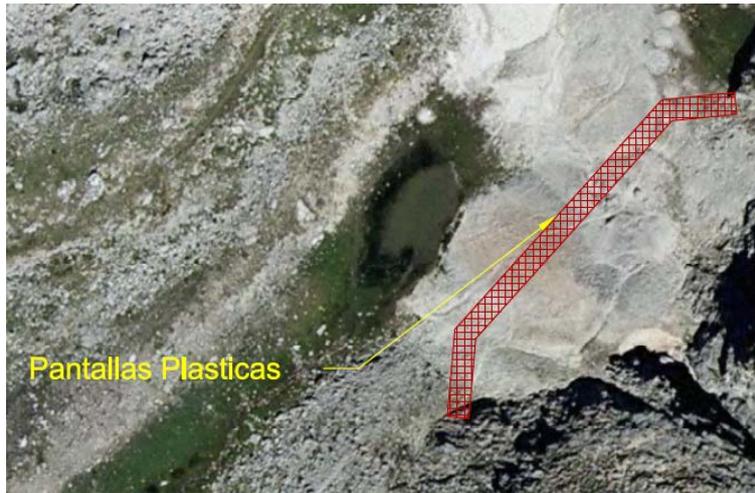


Figura 20. Planta de posible restauración con uso de pantallas plásticas.

## Deep Soil Mixing

*Descripción:* esta técnica de mejora del terreno consiste en el mezclado profundo de los materiales disgregados del terreno con un cementante, líquido o sólido, generando un material nuevo, más competente y resistente que el terreno natural anterior a su aplicación.

De esto se puede deducir que este método está más enfocado a solucionar problemas de resistencia del terreno para su uso como base de cimentación. Pero si al cementante que se utiliza en el mezclado se le añade un elemento impermeabilizante, como puede ser la adición de bentonita u otras arcillas, podrían funcionar como elemento impermeabilizante del terreno.

El *deep mixing soil* se puede clasificar en dos categorías, mezclado vertical generando columnas o en masa horizontal produciendo fajas o extensiones importantes en planta (Fig. 21).

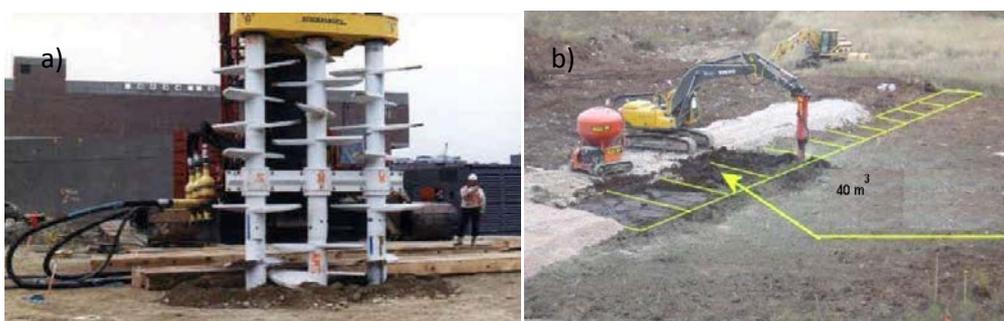


Figura 21. Ejemplo de actuación con a) Deep Mixing vertical y b) Deep Mixing horizontal.

La técnica de mezclado en masa consiste en una retroexcavadora en la que el brazo de la pala se ha sustituido por un brazo excavador con un cabezal rotatorio el cual posee un inyector por el cual se impulsa la mezcla cementante (Fig. 22).



**Figura 22. Imagen del cabezal excavador.**

En el caso concreto de este trabajo, la solución pasaría por excavar las pizarras en la zona afectada creando un nuevo material más impermeable y que funcionara como sello por encima de las calizas.

*Ventajas:* la primera ventaja de este método es que el equipo a utilizar no es muy complejo, únicamente es necesaria una retroexcavadora y una bomba de inyección. Otra ventaja es su rapidez de ejecución, dado que realiza la excavación y aplicación del material impermeabilizante en la misma operación.

*Desventajas:* en primer lugar, el rango efectivo de excavación viene dado por la máxima extensión del brazo de la excavadora el cual nos da rangos de excavación no superior a 5 m de profundidad lo cual en las zonas más alejadas de las capas de calizas es probable que sea insuficiente.

La capacidad de excavación del cabezal rotatorio, que está diseñado principalmente para suelos sueltos, tiene una fuerza máxima de 37,5 MPa. Pizarras similares a las presentes en la zona de estudio se han descrito con una resistencia de entre 45 y 70 MPa (Rodríguez Sastre, 2006 y 2011) por lo que el cabezal de corte podría verse con dificultades para excavar dichos materiales.

Además como la mayor parte de las filtraciones se sitúan por debajo de la escombrera, esta se tendría que retirar para la ejecución del tratamiento lo que implicaría un fuerte perjuicio medioambiental.

## Inyecciones

*Descripción:* las técnicas de inyección consisten generalmente en la introducción de un material fluido en el terreno que puede rellenar los huecos existentes en los materiales (impregnación), puede desplazar los materiales existentes (sustitución) o se puede mezclar con el terreno (consolidación). Con estas acciones se espera alterar las características geotécnicas de los materiales tratados siendo de interés en este estudio la reducción de la permeabilidad de los mismos (Fig. 23).



**Figura 23. Ejemplo de obra de perforación para efectuar inyecciones de cemento. Presa de Wolf Creek Kentucky EE.UU.**

Para la realización de estas inyecciones se han de realizar una serie de sondeos previos en la zona en la que se quiere actuar. Además hay que diseñar las características del fluido que se va a inyectar para que sea lo más eficaz posible en la zona a tratar. Para un buen diseño de inyecciones hay que tener en cuenta cuatro parámetros principales.

En primer lugar hay que tener en cuenta la viscosidad del fluido a inyectar ya que este factor va a condicionar la penetrabilidad del mismo por las fracturas y poros de las rocas. Así, cuanto mayor sea la viscosidad del fluido empleado en la inyección, mayor ha de ser la apertura de las diaclasas por las que se inyecte dicho fluido.

La siguiente característica es la presión de inyección, que condiciona el radio efectivo a la que el fluido se difunde, a mayor presión mayor radio de acción. Aumentando la presión de inyección se puede aumentar la separación entre puntos de inyección, lo que permite el abaratamiento de costes, pero este aumento de presión se ha

de realizar siempre sin llegar al límite de resistencia de los materiales a inyectar para no generar una fracturación adicional. En relación a los anteriores factores está el radio efectivo que va depender de la viscosidad, presión de inyección y principalmente por la apertura y continuidad de las fracturas de las rocas a tratar. Este radio efectivo se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$R = \frac{a \cdot p}{\tau_0} + r$$

Siendo:

R= radio efectivo

a= mitad anchura de la diaclasa

p=presión de inyección efectiva

$\tau_0$ = límite de flujo del material de inyección

r= radio de perforación

De la formula se deduce que el radio efectivo es directamente proporcional a la mitad de la anchura de las juntas y a la presión de inyección, e inversamente proporcional al límite de flujo del material inyectado el cual depende de la viscosidad del fluido.

Por último, el tiempo de fraguado o gelificación, que va a depender del tipo de fluido que se utilice. Así, las suspensiones de cemento y bentonita tienen un tiempo de fraguado de entre 2 y 4 horas. Las lechadas químicas de unos 20 minutos de gelificación. Y por último, las resinas y espumas expansivas que poseen periodos de gelificación de unos pocos segundos a varios minutos.

Entre las diferentes técnicas de inyección (consolidación, impregnación y sustitución) la que es más efectiva para el control del agua en el terreno es la técnica de impregnación, que consiste en la inyección de un fluido para rellenar la porosidad, fracturas y fisuras presentes en el terreno para formar un material nuevo más resistente e impermeable.

Estos fluidos de inyección se pueden clasificar en dos grupos diferentes las lechadas de suspensiones (estables e inestables) y mezclas líquidas.

Las suspensiones son mezclas de agua y cemento (inestables) a las que se les puede realizar adiciones de arcillas, bentonitas o aditivos para estabilizar la suspensión.

Estas lechadas al tener partículas en suspensión su capacidad de penetración va estar limitado por la granulometría de las mismas siendo 0,1 mm el límite de apertura mínimo.

Las lechadas líquidas están compuestas por materiales químicos y sus reactivos los cuales generalmente son resinas o productos hidrocarbonados en solución o en emulsión. Dentro de estas, existen multitud de tipos como son los geles de sílice, resinas (acrilamidas, fenoplásticos, aminoplásticos) y resinas acuarreactivas (poliuretano).

Las resinas acuarreactivas son muy útiles en problemas de impermeabilización ya que solo se activan cuando se ponen en contacto con el agua presente en el terreno, lo que evita problemas con la dosificación del catalizador de la resina.

El límite mínimo de apertura de las diaclasas se sitúa en 0,01 mm ya que no poseen partículas en suspensión y además la viscosidad de las mismas es mucho menor que las lechadas de cemento.

*Ventajas:* esta técnica es sencilla de aplicar y los equipos necesarios no son demasiado voluminosos por lo que el impacto sobre el entorno para su traslado a la zona sería moderado.

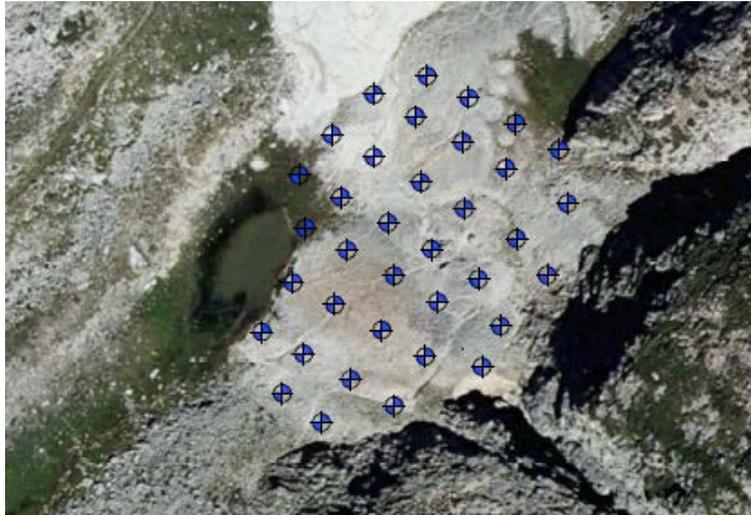
Asimismo la técnica nos permite actuar sobre las filtraciones a través de la escombrera que se sitúa encima sin tener que retirarla por lo que el impacto ambiental en la zona sería también mínimo.

Además, con esta técnica se pueden diseñar soluciones mixtas, aumentando la eficacia del sellado, usando en las zonas en las que las fracturas tengan una apertura mayor las lechadas de cemento-bentonita pudiendo incluso en zonas kársticas de gran apertura inyectar mezclas de baja movilidad. Y en las zonas de fracturas y fisuras más finas se inyectarían resinas acuarreactivas de mayor poder de penetración.

*Desventajas:* algunas lechadas químicas (geles de sílice, acrilamidas, fenoplásticos y aminoplásticos) presentan un carácter tóxico, por lo que no se pueden utilizar ante el riesgo de contaminación de los acuíferos cercanos.

El uso de lechadas de cemento-bentonita requiere un control preciso de la viscosidad inicial de la mezcla para que pueda penetrar eficazmente en el terreno y generar la impermeabilidad del mismo.

El coste económico de esta técnica es más elevado que otras técnicas ya que requiere de múltiples puntos de inyección que se han de perforar en el terreno (Fig. 24).



**Figura 24. Posible esquema de actuación mediante puntos de inyección.**

Por último, también hay que mencionar que aunque es una técnica muy eficaz para realizar impermeabilizaciones, debido a la falta de datos que se posee del terreno sobre la red de fracturación, sobre todo apertura y continuidad, no se puede garantizar el total sellado de todas las fracturas.

## **Jet Grouting**

*Descripción:* el *Jet Grouting*, aunque en esencia es una técnica de inyección del terrero, no se puede agrupar con estas por las particularidades que tiene. En este método se inyecta un material, lechadas de cemento, a una presión muy elevada a través de una boquilla (jet) con el fin de erosionar y disgregar el terreno circundante a la perforación usada para la inyección.

Esta erosión produce una pluma lateral a alta presión de lechada que se une con el propio terreno natural formando un sólido mixto lechada-terreno una vez fraguado. Este sólido resultante es de unas características notablemente superiores en cuanto a resistencia y permeabilidad.

De entre todos los usos de esta técnica, el que presenta mayor interés es el del control del agua. Con esta técnica se pueden realizar tratamientos masivos es decir aplicar esta técnica en una área afectada generando una masa en el fondo que sea impermeable. O se pueden generar cercos construyendo pantallas de cierre en el emplazamiento a inyectar.

La ejecución del *Jet Grouting* consta de las siguientes fases (Fig. 25).

1. Perforación del sondeo guía por donde se introducirá el inyector hasta la cota de diseño.
2. Introducción del varillaje con la boca inyectora que puede poseer entre 1 y 3 inyectores.
3. Inyección de aire o agua a alta presión (40 MPa) y de lechada a media presión (20 MPa) desde el fondo de la perforación con un movimiento ascendente con una velocidad de ascenso constante, normalmente de entre 40 y 80 cm/min. Además el varillaje posee un movimiento rotatorio constante, con una velocidad que varía según varios autores entre 3 y 20 r/min.

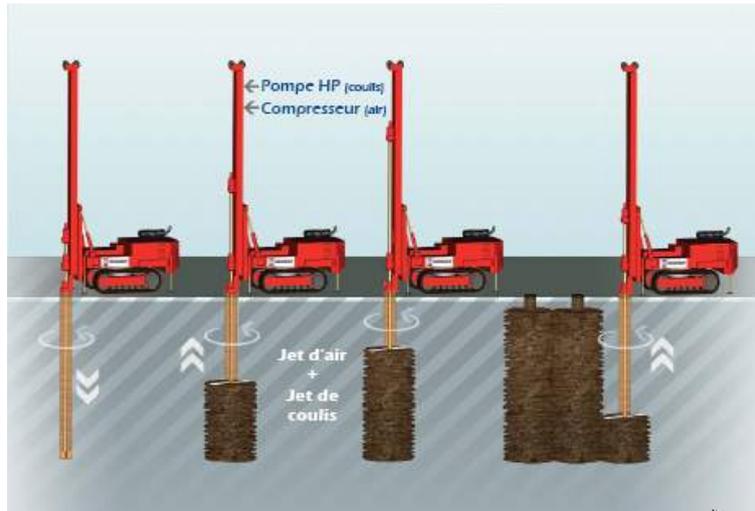


Figura 25. Esquema de ejecución de *Jet Grouting*.

Dependiendo del elemento inyector que se utilizó tenemos los diferentes tipos de técnicas de *Jet Grouting*. Estos inyectores pueden poseer un solo inyector en la que la erosión y mezclado la realiza el chorro de cemento, con dos inyectores en las que además del inyector de cemento existe otro inyector de agua a presión lo que aumenta el poder de penetración del mismo o con tres inyectores en la que el inyector de cemento está revestido de un tercer inyector anular de aire a presión que produce un aumento aun mayor del radio de acción al reducir el ángulo de dispersión del jet de cemento (Fig. 26).

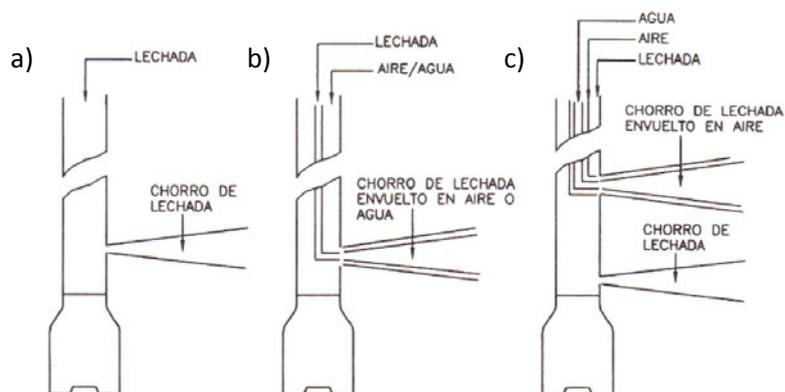


Figura 26. Esquemas de los diferentes tipos de Jets. a) Jet simple b) Jet doble y c) Jet triple. Tomado de Bielza, 1999.

Además, de las técnicas descritas anteriormente también en los últimos años empresas del sector han investigado en *Jet Grouting* de mayores dimensiones que han

denominado *Súper Jet Grouting*. Esta técnica se basa en un control de la energía de la materia inyectada para poder conseguir mayores fuerzas de corte. Con esta técnica se pueden conseguir columnas de diámetro de hasta 5 m (Fig. 27).



**Figura 27. Ejemplo de obra realizada con columnas de Súper Jet Grouting. Tomado de Zuloaga-Fábrega, 2004.**

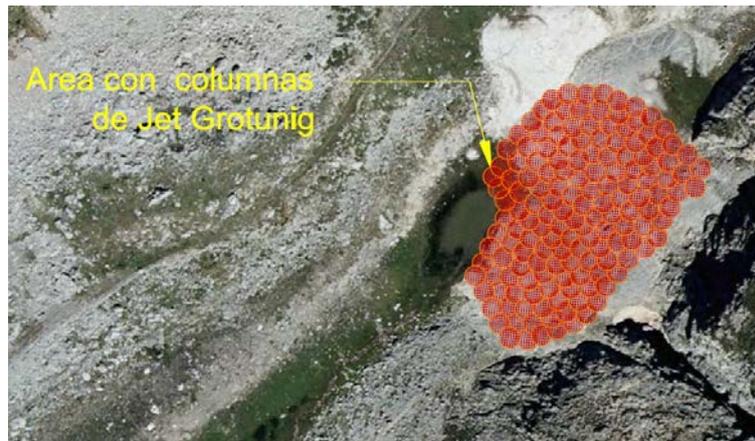
*Ventajas:* la mezcla que utiliza al tratarse de materiales no tóxicos (cemento y bentonita) su aplicación no supondría una afección importante al medioambiente. Esta técnica se puede utilizar a cualquier profundidad siempre que el jet tenga la capacidad de erosión del terreno donde se aplica.

Se trata de una técnica muy eficaz para el control del agua, ya que genera columnas de muy baja permeabilidad. Pudiendo generar amplias zonas tratadas mediante el diseño de áreas con columnas secantes entre sí.

Los equipos necesarios son compactos lo que no implicaría una afección importante al entorno para su traslado a la zona de inyección.

*Desventajas:* la principal de este método es la capacidad de corte del jet. Esta técnica trabaja con presiones de inyección de 40 MPa lo que podría no ser suficiente para excavar las pizarras de la formación Áliva ya que diversos autores (Rodríguez Sastre 2006 y 2011) han descrito pizarras parecidas a estas con una resistencia a compresión de entre 45 y 70 MPa.

Asimismo, la intervención necesaria en el entorno para aplicar esta técnica sería importante por la necesidad de realizar multitud de perforaciones para la creación de las columnas secantes que cubrieran toda la zona afectada (Fig. 28).



**Figura 28. Posible actuación mediante la técnica de Jet Grouting**

Por último, cabe destacar que con esta técnica se generan bastantes cantidades de lodos de rechazo, lo que requeriría la instalación en la zona una planta de tratamiento (desarenizador). Este hecho conllevaría una lógica necesidad de espacio y acondicionamiento del terreno, así como de controlar en todo momento cualquier potencial vertido.

Concluida la descripción de las diferentes técnicas potencialmente aplicables a este caso, en la Tabla 1 se muestra una comparativa de todas ellas, sintetizando en cada caso sus ventajas, inconvenientes, grado de impacto, coste y efectividad.

TABLA COMPARATIVA TÉCNICAS DE MEJORA DEL TERRENO					
TECNICA	VENTAJAS	DESVENTAJAS	IMPACTO AMBIENTAL	COSTE	EFFECTIVIDAD
Geotextiles	Bajo Coste Fácil Aplicación	Intervención excesiva en el entorno	Alto	Bajo	Alta
Geocompuestos	Bajo coste Fácil Aplicación Resistencia a procesos de congelación Reparación de desgarros por la expansión de la bentonita	Intervención excesiva en el entorno	Alto	Bajo	Alta
Pantallas Plásticas	Utilización del propio terreno dentro de la mezcla Capacidad de corte en las pizarras y calizas Muros muy impermeables	Intervención excesiva en el entorno Equipos voluminosos Técnicamente compleja de ejecutar para garantizar un completo sellado	Muy Alto	Alto	Moderada
Deep Mixing Soil	Utilización del propio terreno dentro de la mezcla Maquinaria sencilla	Intervención excesiva en el entorno Insuficiente capacidad de corte	Muy Alto	Medio	Baja
Inyecciones	Posibilidad soluciones mixtas Aplicación sencilla Moderado impacto al entorno Posibilidad de aplicación a través de la escombrera	Algunas lechadas son toxicas Coste elevado Necesario control preciso de la mezcla de inyección	Moderado	Medio-Alto	Media- Alta
Jet Grouting	Utilización del propio terreno dentro de la mezcla Utilización en profundidad. Eficaz en el control de agua	Intervención excesiva en el entorno Insuficiente capacidad de corte	Muy alto	Alto	Baja

Tabla 1. Tabla comparativa entre las diferentes técnicas.

#### 4. SOLUCIONES PROPUESTAS

Una vez expuestas las técnicas potencialmente útiles para afrontar la problemática de permeabilidad planteada, es necesario proceder a la selección de aquellas más idóneas considerando todos los condicionantes.

Como se ha visto en el apartado descriptivo, algunas de estas técnicas deben descartarse por diferentes causas, bien sean de tipo técnico o medioambiental.

Así, las primeras técnicas que se detallan en este trabajo que son las que emplean geotextiles o geomembranas con adiciones impermeabilizantes (bentonita), que aunque son factibles en este caso, no son aconsejables por las implicaciones medioambientales e hidrogeológicas que conllevan.

La técnica descrita como pantallas plásticas se basa en la construcción de un muro de cemento-bentonita, junto con los propios materiales del terreno, para crear una barrera impermeable entre las pizarras y las calizas. El primer problema que plantea el uso de esta técnica es la necesidad de desmontar la escombrera para su aplicación, lo que se considera una intervención excesiva. Y segundo, que al no tener un contacto vertical entre las pizarras y calizas no se puede garantizar que la barrera genere un sello efectivo que impida las filtraciones.

El siguiente método propuesto, denominado *Deep Soil Mixing*, presenta un problema relativo a su rango de aplicación y problemas medioambientales. Como se ha descrito, la base de las filtraciones se encuentra en el contacto entre las pizarras y las calizas a unos 15 m de profundidad. Con esta técnica parece poco probable que se pueda alcanzar dicha cota de excavación además que el cabezal de corte no tiene suficiente fuerza para excavar las pizarras. Además la retirada de la escombrera conllevaría un impacto ambiental inasumible.

La técnica de *Jet Grouting*, que también sería una posible solución para atajar el problema que se plantea, presenta varias desventajas que desaconsejan su uso como solución. Estas desventajas son primero que la fuerza de corte de los chorros de cemento y agua no es suficiente para erosionar y disgregar las pizarras de la formación Áliva, ya que normalmente la fuerza que se ejerce con dichos jets es de unos 40 MPa y la resistencia de pizarras similares se han descrito entre 45 y 70 MPa. Por otro lado los impactos ambientales que se generan en el entorno debido tanto a la gestión de los lodos

generados y a una intervención excesiva, debido a la necesidad de múltiples perforaciones para la creación de las columnas secantes, no son compatibles con el espacio protegido.

Por último, las técnicas de inyección parecen las más idóneas para afrontar la problemática planteada. Entre ellas, son las inyecciones de impregnación, ya sea en su variante de inyecciones de cemento bentonita o las inyecciones de resinas de poliuretano.

Esta técnica es la que menos afección al entorno generaría, al poder actuar sobre las filtraciones que se sitúan debajo de la escombrera minera sin ser necesaria su retirada. Otra ventaja reside en su flexibilidad, dado que permite diseñar soluciones mixtas que se adapten a las diferentes condiciones, apertura y continuidad, de las fracturas y fisuras de los diferentes materiales presentes en el subsuelo. Así, en las zonas de las pizarras, en que se esperan fisuras con poca apertura, se deberían inyectar resinas de baja viscosidad que faciliten la penetración por las mismas y en las fracturas más abiertas de las calizas se pueden inyectar mezclas más viscosas de cemento bentonita pudiendo incluso llegar a ser de baja movilidad si se encuentran grades oquedades o cavernas kársticas.

Y, aunque no se puede garantizar el completo sellado de las fracturas que implique el completo llenado del antiguo lago, sí se considera como la solución más factible para la solución del problema que se plantea.

## **5. PROYECTO DE IMPERMEABILIZACION**

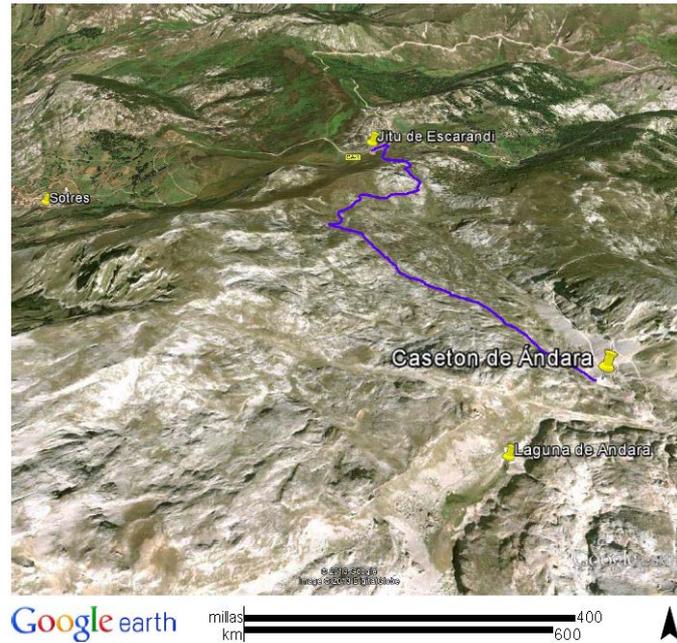
En este apartado se describen las actuaciones necesarias a realizar para el diseño de la solución de impermeabilización de la laguna de Ándara. Inicialmente, se van a definir las actuaciones previas necesarias antes de acometer el tratamiento de mejora propiamente dicho. Estas actuaciones incluyen la solución a los problemas de acceso a la zona de estudio y las posibles campañas de investigación previa a realizar.

Posteriormente, se procederá a definir el diseño de las inyecciones, teniendo en cuenta las limitaciones del entorno y de las condiciones presentes en el substrato. Asimismo, se describirán las medidas de control y vigilancia que se han de tomar durante y una vez finalizada la aplicación de las inyecciones. Y, por último, se ha intentado hacer un cálculo aproximado del coste de la solución propuesta teniendo en cuenta todas las fases del proyecto de mejora.

### **5.1. ACTUACIONES PREVIAS**

La zona de estudio, como se ha descrito anteriormente, se sitúa en un paraje de la reserva natural de Picos de Europa de difícil acceso. Este acceso se realiza a través de una pista que parte desde el alto de Sotres (Jitu de Escarandi) a las antiguas Minas de Mazarrasa.

Este acceso se puede dividir en dos sectores: el primero, que transcurre entre el Jitu de Escarandi y el antiguo casetón de la Mina de Ándara, con una longitud aproximada de 3.050 m y un ancho medio de 3 m (Fig. 29).



**Figura 29.** Mapa de la ruta entre el Jitu de Escarandi y el Casetón de Ándara. Tomado de Google Earth.

En este sector, las actuaciones necesarias para permitir el acceso serían mínimos ya que la anchura de la pista permite el acceso con vehículos todoterreno, en principio suficientes para trasladar todos los materiales necesarios.

El casetón de Ándara constituiría una zona propicia para instalar una base logística donde emplazar los acopios de materiales, casetas de obra, generadores eléctricos y demás utillaje necesario para la actuación. Este emplazamiento, de una extensión aproximada de 3000 m<sup>2</sup> (Fig. 30) solo necesitaría alguna labor menor de nivelación y explanación con la única salvedad, de no afectar a los restos industriales presentes en la zona.

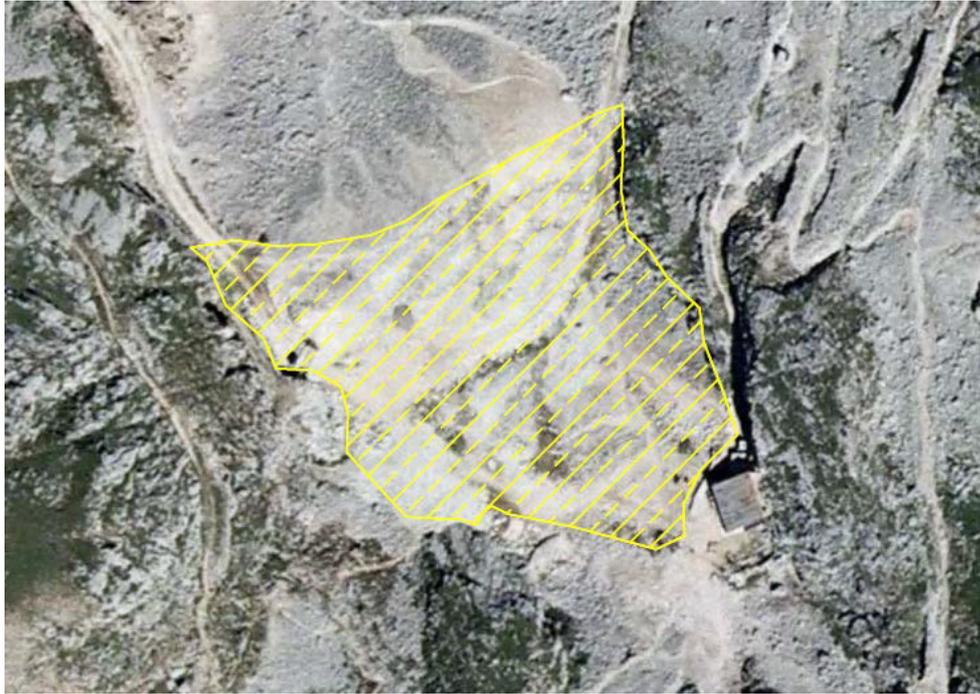


Figura 30. Zona logística potencialmente utilizable frente al Casetón de Ándara.

El segundo sector en la ruta de acceso es el que precisa una mayor intervención. Este acceso es el que transcurre entre el casetón de Ándara y la laguna propiamente dicha, cuya longitud es de aproximadamente 924 m, con un ancho inferior a 1,5 m (Fig. 31).

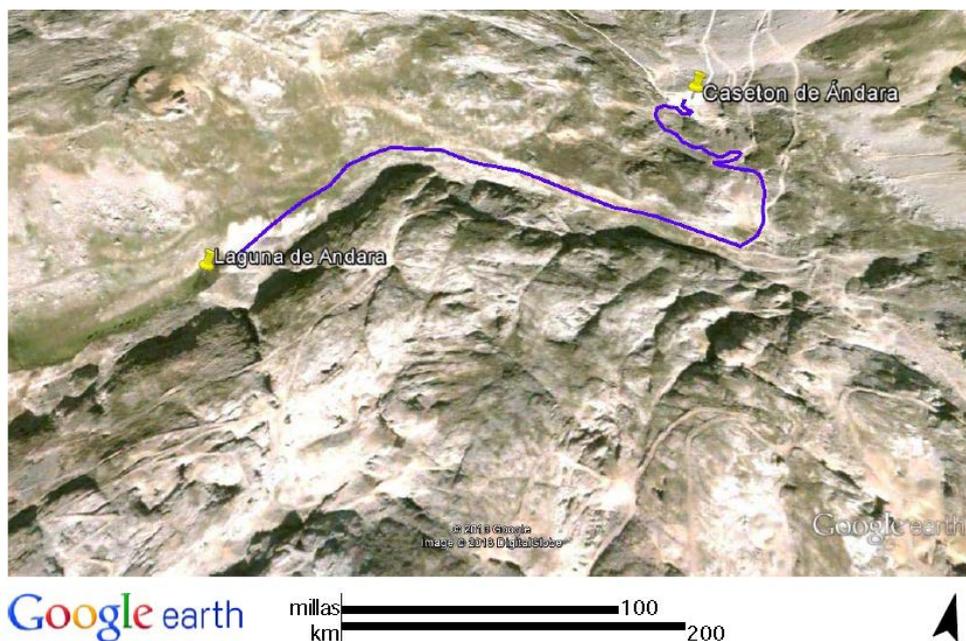


Figura 31. Mapa de la ruta entre el Casetón y la laguna. Tomado de Google Earth.

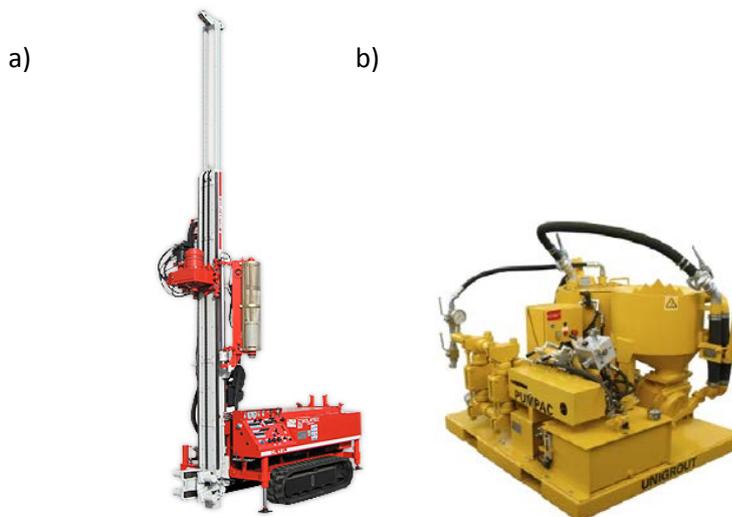
Esta ruta, como se puede apreciar en el perfil representado en la figura 32, presenta dos tramos muy diferenciados, un primer sector de 400 m con fuertes pendientes  $> 40 \%$ , y, un segundo tramo, con pendientes mucho más suaves y descendentes.



**Figura 32. Perfil de elevaciones de la ruta entre el Casetón y la laguna de Ándara.**

El traslado del material de la zona que hemos designado como base hasta la laguna se puede realizar mediante dos métodos.

El primero sería un transporte aerotransportado mediante helicóptero. Los helicópteros pueden alcanzar una capacidad de carga de 10.000 kg, lo cual es suficiente para transportar dichos materiales, dado que la maquinaria más pesada sería la máquina de sondeos con un peso típico de 4.000 kg y la maquinaria de inyección más compacta posee un peso no superior a 1 t (Fig. 33).



**Figura 33. Ejemplo de (a) máquina de sondeos y (b) bomba inyectora de cemento.**

Los problemas de esta solución radican en su elevado coste económico y problemas de operatividad, todo ello sin entrar a valorar su afección sonora y visual.

La segunda opción consistiría en efectuar una pista provisional de acceso. Esto conllevaría la ejecución de desmontes y rellenos creando una pista en rampas escalonadas, reduciendo la pendiente, con curvas de unión con un radio de giro más o menos amplio y una plataforma de 3 m de ancho mínimo. Esta solución conlleva un fuerte impacto tanto en su ejecución, como en el periodo que transcurre hasta su restauración.

Como aspectos a favor, cabe destacar que una pista tiene un carácter permanente en el transcurso de la obra, que hace independiente a agentes externos el transporte de materiales.

## 5.2. CAMPAÑA DE INVESTIGACION

Teniendo en cuenta la falta de datos sobre la disposición, continuidad y apertura de las fracturas que provocan las filtraciones se ve necesario el acometer una pequeña campaña de investigación previa a la realización de las inyecciones. Su objetivo sería mejorar el conocimiento geológico para diseñar unas inyecciones lo más efectivas posible. Esta investigación se debe centrar en definir la red de fracturas de las calizas ya que estas previsiblemente sean las de mayor entidad. Debido a esto, la zona en la que se deberían centrar las investigaciones es en el contacto entre las pizarras y las calizas, especialmente bajo la antigua escombrera minera.

Una posible campaña de investigación es la que se propone en la figura 34, consistente en cinco sondeos con recuperación de testigo hasta a una profundidad máxima de 30 a 40 m. Para su estimación, se ha tenido en cuenta, por una parte, que las galerías que actúan como sumideros están a una profundidad en torno a los 15-30 m del fondo del valle, por lo que las filtraciones no deberían situarse a una cota inferior a dichas galerías; por otra parte, la escombrera tiene una altura aproximada máxima de 10 m sobre el fondo del valle.

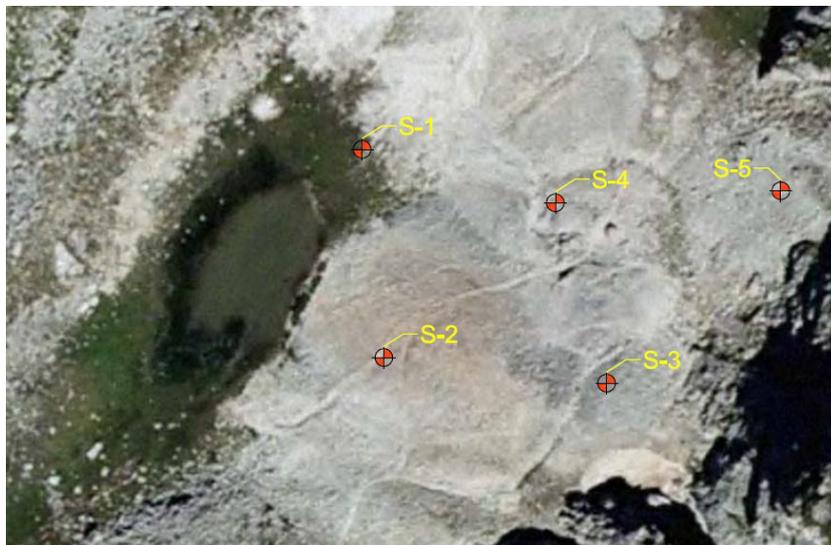


Figura 34. Plano de situación de los sondeos investigación propuestos.

Asimismo, se recomienda, si es factible, llevar a cabo un reconocimiento de las antiguas labores mineras, tanto para recabar nuevos datos geotécnicos del macizo rocoso, cómo para determinar la disposición detallada de la red de diaclasado y fracturación que afectan a las calizas.

### 5.3. INYECCIONES DE IMPREGNACION

Las inyecciones de impregnación constituyen la técnica más ventajosa para dar solución al problema de filtraciones del lago. Esta técnica consiste en la inyección de un fluido, de base cemento o químico, que rellena las fracturas, huecos y poros produciendo una rebaja de la permeabilidad de la zona.

Seguidamente, en este apartado, se va a realizar la descripción de los equipos que se han de utilizar en dichas inyecciones, de los métodos de ejecución de la misma y de los parámetros a considerar para la elección del tipo de lechada más apropiada a inyectar.

#### Equipos

Para ejecutar este tratamiento, en primer lugar se deben realizar son las perforaciones de los puntos de inyección. Éstas se pueden realizar con multitud de equipos existentes en el mercado; para escoger el más adecuado hay que tener en cuenta tanto las condiciones del material a perforar como la situación de las mismas.

Teniendo en cuenta que las perforaciones necesarias no son excesivamente profundas (aproximadamente 30 m) y que el entorno del lago es de difícil acceso sería aconsejable el uso de máquinas de perforación compacta, como pueden ser una máquina de sondeos geotécnicos sobre orugas (Fig. 39); ésta posee tanto la capacidad de perforar los materiales presentes como el rango de perforación necesario.



Figura 39. Ejemplo de máquina de perforación sobre orugas.

Finalizadas las perforaciones se procede a ejecutar las inyecciones y, para ello, se deben utilizar equipos específicos que van a depender del tipo de inyección, siendo diferentes para las mezclas con base de cemento de las lechadas de resinas.

Así, en las de base de cemento, se necesita primero una mezcladora que genere la suspensión de agua, cemento y bentonita. Esta suspensión se ha de almacenar en un tanque agitador para que dicha suspensión no se disgregue. Por último es necesario una bomba de inyección (de pistón, cavidades progresivas, centrifugas, de hormigón) que impulse el fluido a presión por las líneas de distribución, mangueras normalmente de PVC, hacia los puntos de inyección (Fig. 40).



Figura 40. Ejemplos de a) Bomba para cemento-bentonita b) Mezclador de cubeta y c) Tanque agitador.

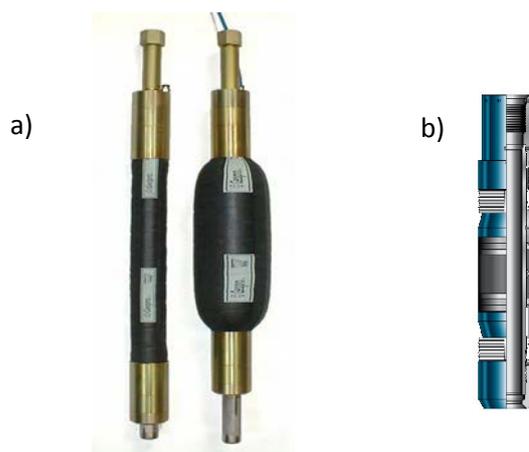
Para las inyecciones de resina solo se necesita la bomba de inyección (Fig. 41) que, en este caso, hace de mezclador, ya que se trata de un aparato de doble línea que simultáneamente inyecta y mezcla tanto la resina como el agente endurecedor.



Figura 41. Ejemplo de bomba mezcladora para inyección de resina.

Los últimos equipos necesarios para la ejecución del tratamiento son comunes a los dos sistemas de inyección; se trata de los obturadores que se disponen en las tuberías de inyección, y que sirven para aislar la zona que se quiere tratar.

Estos equipos (Fig. 42) son muy útiles para la ejecución de soluciones mixtas, en las que una zona se vaya a tratar con cemento y otras con resinas ya que permite utilizar la misma perforación para los dos tipos de inyección.



**Figura 42. Ejemplos de obturadores utilizados en sondeos. a) Obturador neumático y b) Obturador mecánico.**

### **Métodos de ejecución**

La forma de ejecutar las inyecciones puede ser de tres tipos. Un primer método, denominado etapas descendentes (Fig. 43) en el que se va perforando en tramos cortos e inyectando de forma descendente, es decir se perfora hasta una cierta profundidad, seguidamente se inyecta y se procede a perforar la siguiente etapa. El proceso se va repitiendo hasta alcanzar la profundidad de diseño. Este método es muy utilizado cuando la zona a tratar esta muy fracturada, por lo que es necesario ir perforando longitudes cortas y su posterior inyección antes de continuar perforando.

El segundo método es el de las etapas ascendentes (Fig. 43), en el que primero se perfora toda la longitud de pozo a inyectar para después, con la ayuda de un obturador, ir aislando zonas del mismo e ir aplicando la inyección de forma ascendente desde el fondo de la perforación.

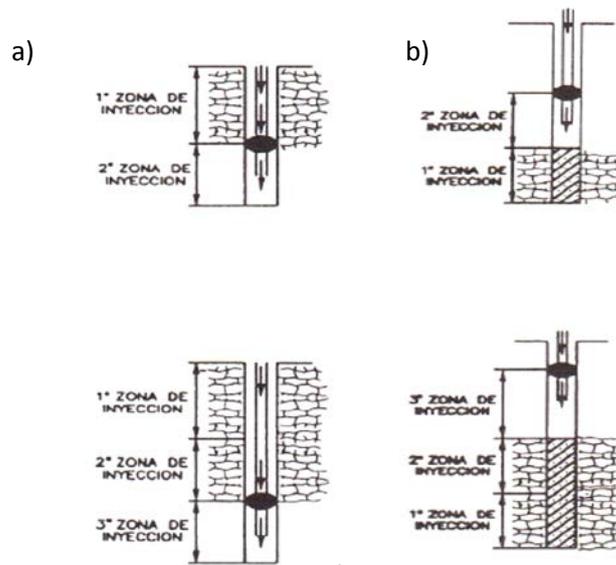


Figura 43. Esquemas de métodos de ejecución de inyección a) Etapas descendentes b) Etapas ascendentes.

Tomado de Bielza, 1999.

Por último, se puede utilizar el método del tubo-manguito que consiste en un tubo de acero o plástico de entre 37,5 y 62,5 mm de diámetro por el cual se inyecta la mezcla a través de unas perforaciones, todas ellas recubiertas por un manguito de goma que se hincha por la acción de la presión de la inyección (Fig. 44).

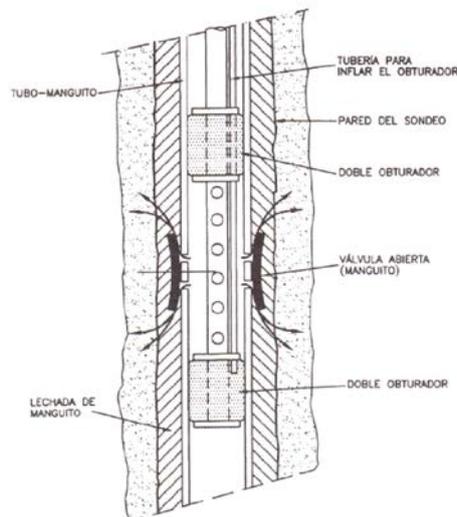


Figura 44. Esquema de método de ejecución mediante Tubo Manguito. Tomado de Bielza, 1999.

Para la aplicación de este método el sondeo ha de estar relleno de una lechada grosera de bentonita que impida el escape de la lechada de inyección hacia la superficie.

Las ventajas de este método son un mayor control de la zona que se quiere inyectar, la posibilidad de realizar reinyecciones si el tratamiento no es efectivo en la primera inyección y la posibilidad de realizar inyecciones de diferente tipo en el mismo sondeo (zonas con resinas y zonas con cemento-bentonita).

Como se puede observar, el método a utilizar más aconsejado es el último ya que permite la adopción de soluciones mixtas donde unas zonas se inyecten con resinas y otras con mezclas de cemento bentonita.

### Diseño del esquema de inyección

En los métodos de impermeabilización con inyecciones lo más aconsejable siempre es inyectar simultáneamente el mayor número de puntos, normalmente grupos de hasta 10 perforaciones, para intentar garantizar la completa difusión por la red de fracturas. Esto se puede conseguir mediante dos esquemas diferentes de inyección.

El primero sería el de las inyecciones en serie (Fig. 45), en la se crean series contiguas de perforaciones empezando por el borde más exterior de la zona de filtraciones y avanzando hacia el interior. Este método tiene una gran ventaja a su favor es que la inyección como se ve en la figura se hace a favor del flujo de infiltración lo que facilita la dispersión de la lechada hacia la propia zona de filtraciones.

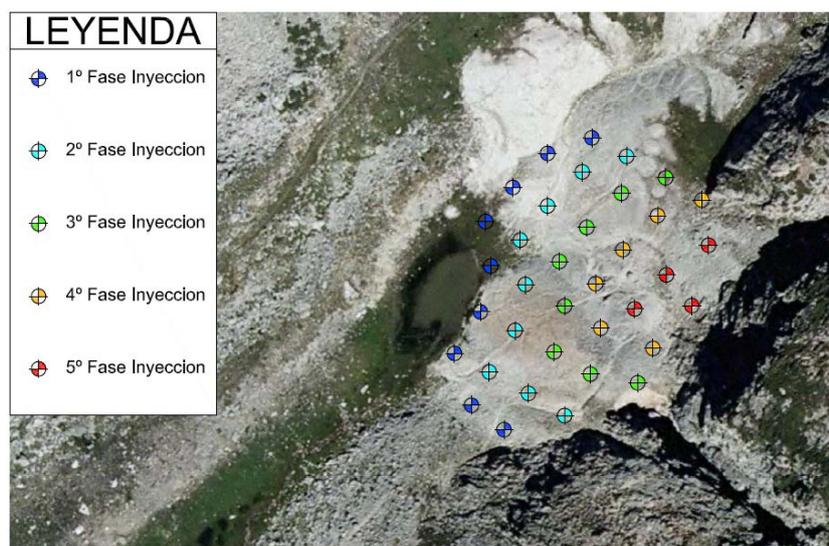


Figura 45. Representación de las fases de inyección propuestas mediante un esquema en serie.

El segundo esquema, denominado cierre de espaciado, se realiza por etapas empezando por los sondeos más extremos y separados en la primera fase. Posteriormente, en una segunda fase, se inyecta en los pozos secundarios que se sitúan en el punto medio entre los dos sondeos de la primera fase. En la tercera fase se inyecta en el punto medio entre los de la primera y la segunda y así sucesivamente hasta conseguir el espaciado entre sondeos que se haya diseñado (Fig. 46).

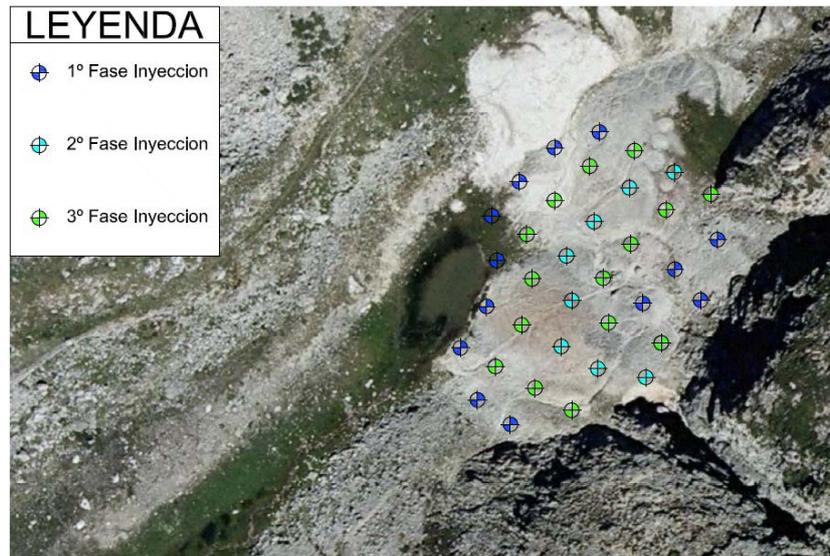


Figura 46. Representación de las fases de inyección propuestas mediante cierre de espaciado.

La ventaja de este método es que se inyecta creando un contorno desde la zona más externa de las filtraciones hacia la más interna.

### Tipo de lechada aplicada

Como se ha descrito anteriormente, las lechadas que se aconsejan para el tratamiento de las filtraciones de la zona afectada son de dos tipos. La primera posibilidad es el uso de una mezcla de cemento con bentonita, mientras que una segunda posibilidad es la lechada química de resina de poliuretano.

Lo más aconsejado sería la utilización de un único tipo de mezcla para la solución de todas las filtraciones, pero debido a la previsible diferencia entre las fracturas en las pizarras y las existentes en las calizas lo más probable sea la necesidad

de utilizar una solución mixta en la que se use una combinación de ambos tipos de lechadas para la reparación de las filtraciones.

Un primer factor que recomienda tomar esta solución es la apertura de las fisuras de las rocas ya que cuanto menor sea esta apertura la viscosidad de la mezcla necesaria para poder infiltrarse a través de ella va a ser menor.

Esta viscosidad va a ser determinante en el posible uso de las lechadas de cemento-bentonita, ya que al tratarse de una suspensión de granos sólidos de cemento y arcilla, el tamaño de grano limita la aplicabilidad de la mezcla. En la normativa española referente a los procedimientos de inyección se indica que para rocas fisuradas dicho límite se sitúa en fracturas y fisuras con aperturas menores a 0,1 mm (Fig. 47).

Medio	Categoría	Inyección sin desplazamiento			Inyección con desplazamiento
		Impregnación	Fisura/contacto	Relleno	
Suelo granular	Grava, arena gruesa y grava arenosa $K > 5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$	Suspensión de cemento puro suspensión de base cemento			
	Arena $5 \times 10^{-5} \text{ m/s} < K < 5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$	Suspensiones microfina, disoluciones			Suspensión de base cemento, morteros
	Arena fina a media $5 \times 10^{-3} \text{ m/s} < K < 1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$	Suspensiones, microfina, disoluciones, productos especiales			
Roca fisurada	Fallas, fracturas, karst $e > 100 \text{ mm}$		Morteros de base cemento, suspensiones de base cemento (arcilla, fillers)	Mortero, suspensión de base cemento de fraguado rápido, espuma de poliuretano, otros productos reactivos al agua	
	Fracturas fisuras $0,1 \text{ mm} < e < 100 \text{ mm}$		Suspensión de base cemento, suspensiones microfina		
	Microfisuras $e < 0,1 \text{ mm}$		Suspensiones microfina, geles de silicato, productos especiales		
Cavidades	Huecos importantes			Mortero de base cemento de fraguado rápido, espuma de poliuretano, otros productos reactivos al agua	

e = Anchuras de las grietas

**Figura 47. Tabla de aplicación de lechadas de cemento. Tomada de UNE-EN 12715.**

Por el contrario las lechadas químicas, debido a que no tienen sólidos en suspensión, tienen un poder de penetración mayor, pudiendo inyectarse hasta en fisuras con una apertura de 0,01 mm.

En las pizarras es previsible que las fracturas y fisuras tengan una apertura inferior a 0,1 mm, por lo que sería difícil que la mezcla de cemento bentonita se difundiera a través de ellas lo que aconseja el uso de resinas. En las calizas, con toda seguridad, se encontrarán fracturas con mayor apertura y con la posibilidad de encontrar

cavidades y huecos grandes debido a la karstificación de las mismas. Como las mezclas de cemento bentonita permiten variar la viscosidad de la mezcla es posible adaptarse a las diferentes tipos de fracturas en las calizas, pudiendo llegar a utilizar morteros de baja movilidad para rellenar grandes huecos y cavidades que se pudieran encontrar en las mismas.

Con todo lo descrito anteriormente, un posible plan de inyección sería la utilización en una primera fase de una mezcla de cemento bentonita, sellando las fisuras y huecos más grandes de la roca caliza (Fig. 48). En una segunda etapa, utilizar una mezcla de resinas en las pizarras para rellenar las fisuras más finas y de difícil acceso (Fig. 49).

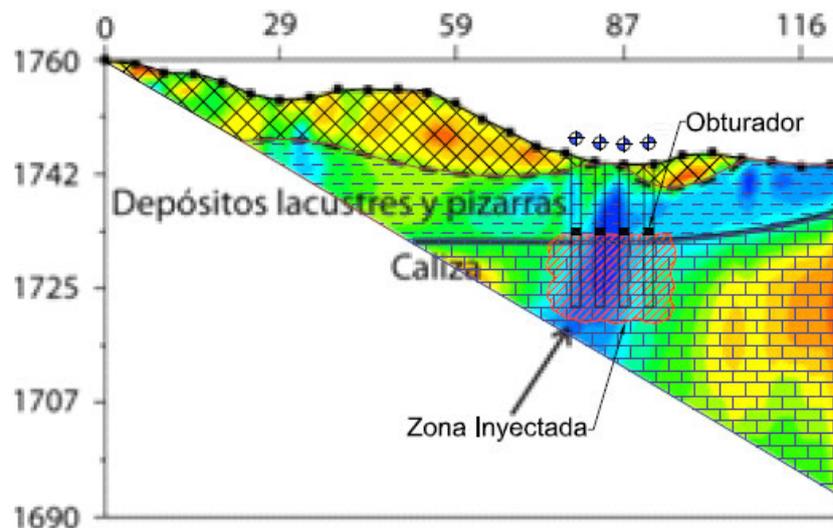


Figura 48. Perfil de la 1ª fase de inyección en calizas con cemento-bentonita.

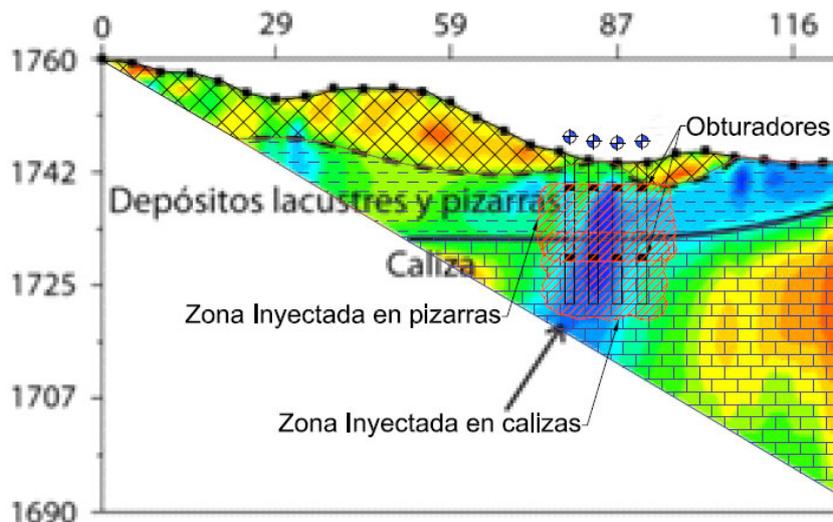


Figura 49. Perfil de la 2ª fase de inyección en pizarras con resinas.

## **Condicionantes logísticos y medioambientales**

Como ya se ha descrito en este trabajo, las dificultades de acceso limitan el uso de maquinaria de gran entidad, por lo que al diseñar la solución hay que tratar de minimizar el uso de materiales y maquinarias ya que suponen un problema serio de logística.

Otro problema que se plantea es el del agua necesaria para la realización de las perforaciones e inyecciones. Para la perforación se necesitan importantes cantidades de agua la cual, la cual se podría tomar del entorno o bien ser trasladada a la zona mediante cubas con el consiguiente aumento de los costes del proyecto y problemas logísticos.

Asimismo, durante la ejecución de los puntos de inyección se generan lodos de perforación, mientras que durante la inyección de cemento-bentonita se generan lodos de rechazo. Ambos deben ser tratados *in situ* mediante técnicas de separación (desarenizador) o ser recogidos y trasladarlos fuera de la zona.

En relación a las cuestiones medioambientales, sería necesario realizar un estudio de impacto ambiental previo a la ejecución de la solución. En este estudio se debe realizar tanto para las actuaciones previas necesarias para el acceso de la zona como para garantizar que el uso de las diferentes mezclas de inyección no va a suponer un riesgo de contaminación de los acuíferos subyacentes.

## 5.4. CONTROL Y VIGILANCIA

Una parte importante del diseño de esta solución es el tener previsto las actuaciones necesarias para un control de calidad de la aplicación de las inyecciones y posteriormente un seguimiento y vigilancia de la solución adoptada.

En una primera fase, durante la ejecución de la impermeabilización, es importante controlar que no se produzca una fracturación adicional en las rocas durante la aplicación del tratamiento. Asimismo, es importante comprobar que la obturación de las fracturas es efectiva y que no se está escapando la inyección por las galerías que actúan como sumideros.

Este control se debe realizar especialmente en el tratamiento de las calizas con cemento-bentonita ya que son estas las que se encuentran más profundas y de las que va a depender un sello efectivo ante las filtraciones. Este seguimiento se debe realizar mediante un control de la presión de inyección. Por ello, las líneas de distribución de la lechada deben estar monitorizadas con manómetros que midan constantemente la presión de inyección.

Esto es así debido a que variaciones en esta presión indican diferentes situaciones en el macizo. Así, una bajada brusca de la presión de inyección puede significar que se está produciendo fracturación adicional, por donde se libera la presión, o que la lechada de inyección ha encontrado un hueco o fractura más grande por el que se filtra y no está sellando debidamente dicho hueco. Si esto último ocurriese se debería modificar la viscosidad de la mezcla para que se adapte a la nueva situación y así conseguir una mejor obturación.

La monitorización de la presión de inyección, junto con el control del caudal de inyección, se utiliza para decidir el momento de corte de inyección. Si la presión de inyección se mantiene constante y el caudal disminuye (Fig. 50) se entiende que las fisuras se han sellado y no admiten más lechada de cemento-bentonita.

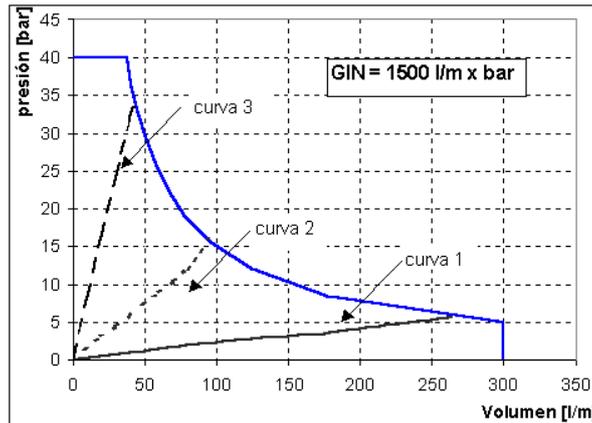


Figura 50. Gráfico representando la presión de inyección frente al caudal. Tomado de Giordano, 2008.

En una segunda fase se debe realizar un seguimiento de la obra, que se debe centrar principalmente en dos parámetros. El primero es el control del llenado del lago, que va a depender tanto del grado de efectividad del tratamiento aplicado, así como de la situación de otras zonas de fuga natural del agua.

Por otra parte también hay que hacer un seguimiento de que el llenado del lago no produzca una desestabilización de la escombrera. Para ello se deben utilizar técnicas de auscultación que monitoricen los posibles movimientos de la misma. Para ello es aconsejable aprovechar los sondeos utilizados durante la campaña de investigación como puntos de control mediante la instalación de tubería inclinométrica. Los puntos más favorables para realizar dicho control son el S-2 y S-3 por estar situados en el talud de la escombrera con mayor pendiente, siendo por tanto la zona más inestable de la misma.

## **5.5. COSTE ECONÓMICO**

En este apartado se ha intentado hacer una estimación del coste de la solución definida en este trabajo. Para ello se han consultado diferentes bases de datos de precios de las técnicas constructivas previstas.

En la estimación realizada no se han tenido en cuenta el coste que supondrían las actuaciones previas a realizar en los accesos debido a que no se dispone de una cubicación del material que se necesitaría excavar ni del que se tendría que aportar para la creación de los terraplenes y taludes de las rampas de acceso.

Tampoco se ha incluido el coste de realizar el estudio de impacto ambiental y los costes administrativos de solicitar los permisos necesarios para acometer este tratamiento.

Un primer coste a tener en cuenta es el realizar la campaña de investigación que suponen cinco sondeos con una profundidad máxima de 40 metros. En este apartado también se ha tenido en cuenta el coste de la instrumentación de dos sondeos para el control de la escombrera (Tabla 2).

<b>PRESUPUESTO CAMPAÑA INVESTIGACIÓN Y SEGUIMIENTO ESCOMBRERAS</b>				
<b>UD.</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>COSTE UNITARIO</b>	<b>TOTAL</b>
	Ud. Abono fijo por transporte de cada equipo de sondeo o penetrómetro estático al área de trabajo, incluyendo el primer emplazamiento	1	1.025,91 €	1.025,91 €
m	Ml. Perforación a rotación vertical o subvertical (< 30°) en roca de resistencia media, a partir de 20 m de profundidad y no superior a 50 m (según resistencia compresión, tabla IV.9, J. Salas, 1.975, Manual Taludes), incluyendo testificación "in situ" a cargo de técnico experto, ASTM D6286-98	200	74,07 €	14.814,00 €
m	Ml. Recargo por perforación con suministro de agua	200	4,88 €	976,00 €
m	Ml. Tubería inclinométrica de aluminio, incluida la parte proporcional de tapón de fondo y tapa con candado	80	29,11 €	2.328,80 €
Ud.	Ud. Instalación de tubería inclinométrica en sondeo, incluyendo los trabajos de sellado de uniones, inyección de lechada y mojón en embocadura	2	643,66 €	1.287,32 €
<b>COSTE TOTAL</b>				<b>20.432,03 €</b>

**Tabla 2. Coste estimado de la campaña investigación y del seguimiento de las escombreras.**

Para el cálculo del coste de las inyecciones se ha tenido en cuenta que se han propuesto la realización de 36 puntos de inyección y 30 metros de profundidad lo que suponen 1080 metros de inyección como se puede observar en la tabla 3.

PRESUPUESTO CAMPAÑA DE INYECCIONES				
UD.	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	COSTE UNITARIO	TOTAL
	Transporte, puesta en obra y retirada de equipo completo para la realización de inyecciones de lechada de cemento a presión.	1	8.220,30 €	8.220,30 €
m	Columna de terreno consolidado mediante inyecciones de lechada de cemento, 300 kg/m de consumo medio.	1080	74,07 €	79.995,60 €
<b>COSTE TOTAL</b>				<b>88.215,90 €</b>

Tabla 3. Coste estimado de las inyecciones.

A estos costes hay que añadir los gastos generales y el beneficio industrial que conlleva cualquier obra, siendo este un 6% de gastos generales y 6% de beneficio industrial sobre el presupuesto de ejecución. Asimismo hay que añadir el coste del Plan de Seguridad y Salud (0,4% sobre presupuesto) y añadir el impuesto de valor añadido vigente (21%) (Tabla 4).

PRESUPUESTO PROYECTO		
UD.	DESCRIPCIÓN	TOTAL
	<b>Campaña de investigación</b>	15.790,00 €
	<b>Inyecciones</b>	88.215,90 €
	<b>Control y seguimiento</b>	3.616,12 €
	<b>Gastos generales y beneficio industrial</b>	12.914,64 €
	<b>Plan seguridad y salud</b>	482,15 €
	<b>IVA</b>	25.413,95 €
<b>COSTE TOTAL</b>		<b>146.432,76 €</b>

Tabla 4. Presupuesto estimado del proyecto de impermeabilización.

## 6. CONCLUSIONES

En este Trabajo de Fin de Máster han sido analizadas las posibles técnicas de tratamiento del terreno válidas para la recuperación del antiguo Lago de Ándara (Parque Nacional de los Picos de Europa).

Así, se han examinado las características de cada una de los métodos potencialmente válidos, considerando en cada caso el contexto medioambiental en que se debe llevar a cabo la intervención.

A partir de los antecedentes y del trabajo realizado se pueden destacar las siguientes conclusiones:

- Las galerías mineras están funcionando como sumideros, actuando las fracturas producidas en las pizarras y calizas como mecanismo de pérdida de agua del antiguo lago de Ándara.
- La zona a tratar tiene una superficie aproximada de 3.600 m<sup>2</sup>, estando situada en un Parque Nacional, lo que conlleva importantes limitaciones medioambientales.
- Para lograr una adecuada intervención es preciso ampliar la información sobre la red de fracturación provocada por las labores mineras, especialmente en lo relativo a su apertura y a su continuidad.
- Para ello se propone llevar a cabo nuevos y más exhaustivos estudios de investigación. Éstos deberían incluir una campaña de, al menos, cinco sondeos perforados en la zona de la escombrera así como estudios de la estructura del sustrato realizados desde el interior de las antiguas galerías mineras, mediante técnicas espeleológicas.
- Las técnicas más simples, que consistirían en la impermeabilización del fondo del lago mediante geotextiles y geomembranas, no son utilizables por las restricciones medioambientales.
- La técnica de pantallas plásticas debe descartarse por la intervención excesiva, la complejidad de la técnica y la no garantía de realizar un sello efectivo ante las filtraciones.
- Las técnicas Deep Soil Mixing y Jet Grouting no tendrían suficiente capacidad de corte para excavar e inyectar la lechada de cemento en las pizarras.

- Las técnicas más favorables en este caso serían la inyección de cemento-bentonita o la inyección de resinas de poliuretano. La solución que se propone en este estudio es el uso de una combinación de ambas técnicas, motivada por las diferencias entre las fisuras presentes en las pizarras y las fracturas y huecos que presentan los niveles carbonatados.
- Es necesario, durante y posteriormente a la aplicación, el realizar un plan de control y seguimiento que garantice tanto un sellado eficaz de la inyección, como no ocasionar inestabilidades en los taludes de las escombreras.
- No es posible garantizar el completo llenado del antiguo lago debido ya sea por el grado de eficacia que se consiga con la inyección como por la existencia de zonas ocultas fracturadas de las que no se tenga constancia.
- En todo caso, es necesaria la realización de un estudio de impacto ambiental de la solución propuesta, que asegure la preservación de los acuíferos subterráneos.
- El coste económico de la solución sería aproximadamente de 146.432,76 € sin tener en cuenta las actuaciones previas y los costes del estudio de impacto ambiental.

## 7. REFERENCIAS

- Armijo Palacio, Gustavo E (2005): Técnicas nuevas de mejora del terreno: VCC, GEC, CMC, DSM, RIC, HDDG. *Geocisa*, 35-46.
- Bielza Feliu, Ana (1999): Manual de técnicas de mejora del terreno. *Entorno Grafico*, 151-250.
- Cuellar Mirasol, Vicente (2004): Inyecciones por fracturación e inyecciones de impregnación. *Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica*, 1-33.
- Farias Arquer, Pedro; Fernández Viejo, Gabriela; Gallastegui Suárez, Jorge; López Fernández, Carlos; González Cortina, Juan Manuel; Olana Allué, Javier (2010): Estudio geológico y geofísico del sustrato del lago de Ándara –Parque nacional de Picos de Europa. Universidad de Oviedo, 1-62.
- Giordano, Pablo (2008): Tratamiento de fundaciones -Inyecciones-. *Universidad nacional de la Plata*, 1-23.
- Julivert, M (1971<sup>a</sup>): Decollement tectonics in the hercynian Cordillera of North west Spain. *Amer. Jour. Sci*, 270 (1): 1-29.
- Marote Ramos, Gerardo (2007): Pantallas de Suelo-Cemento con hidrofresa. *Terrabauer, S.L*, 1-10.
- Marquínez, J (1989): Mapa geológico de la región del Cuera y los Picos de Europa. *Trabajos de Geología*, Universidad de Oviedo, 18: 137-144.
- Marquínez, J. y Adrados, L. (2000): La geología y el relieve de los Picos de Europa. *Naturalia Cantabrica* 1, 3-19.
- Marquínez, J y Adrados, L (2004): Itinerario geológico por los Picos de Europa. *Geocantabria: Itinerarios geológicos*, 123-147.
- Perez-Estaún, A.; Bastida, F.; Alonso, J.L.; Marquínez, J.; Aller, J.; Álvarez-Marrón, J.; Marcos, A.; Pulgar, J.A. (1988) A thin-skinned tectonics model for an arcuate fold and thrust belt: the Cantabrian Zone (Variscan Ibero-Armorican Arc). *Tectonics*, 7(3): 517-537.
- Rodríguez-Sastre, M. A. (2006): Clasificación geomecánica de macizos pizarrosos en el sinclinal de Truchas. *Geogaceta*, 40: 43-46.
- Rodríguez Sastre, M. A. (2011): Compresión triaxial de materiales pizarrosos ordovícicos del NO de España. *Boletín Geológico y Minero*, 122: 109-114.

- UNE-EN 12715 (2001): Ejecución de trabajos geotécnicos especiales. Inyecciones. *AENOR*, 1-58.
- Zuloaga-Fábrega, Ignacio (2004): SuperJet -Grouting: Nueva tecnología para la mejora in situ del terreno. *Jornadas técnicas SEMSIG-AETESS*, 193-208.