

**APÉNDICE N°7. ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO**



**ÍNDICE**

1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETO .....	1
2.- INFORMACIÓN DISPONIBLE .....	1
3.- HIDROGEOLOGÍA REGIONAL .....	1
4.- INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA.....	2
5.- MAREAS EN LA RÍA DE AVILES.....	2
6.- CAMPAÑA HIDROGEOLÓGICA REALIZADA .....	4
6.1.- POSICIÓN DEL NIVEL FREÁTICO .....	4
6.2.- PERMEABILIDAD .....	8
7.- HIDROGEOLOGÍA SUBTERRÁNEA .....	8
8.- RIESGOS Y CONDICIONANTES HIDROGEOLÓGICOS.....	10
9.- DISEÑO DE LOS SIFONES.....	11
9.1.- Introducción.....	11
9.2.- Características constructivas .....	12
9.2.1.- Engravillado .....	12
9.2.2.- Entubación .....	12
9.2.3.- Perforación.....	12
9.2.4.- Limpieza del pozo .....	12
9.2.5.- Desinfección del pozo.....	12
9.3.- Labores de mantenimiento.....	13
10.- ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO NUMÉRICO DEL TRAMO SOTERRADO .....	13

**ÍNDICE DE ILUSTRACIONES**

Ilustración 1: Situación de los sistemas acuíferos (A partir de A. Navarro et al., 1993)... 1

Ilustración 2: Punto de agua inventariado por CHCantabrico en el entorno de Aviles.....2

Ilustración 3: Datos de carreras de marea en el Puerto de Aviles (Año 2019) .....4

Ilustración 4: Posición del sondeo S-02 en relación a la Ría de Avilés (88 m de distancia entre sondeo y Ría) ..... 4

Ilustración 5: Posición del sondeo S-03 en relación a la Ría de Avilés (33 m de distancia entre sondeo y Ría) .....5

Ilustración 6 Variación del nivel freático en S-02 .....6

Ilustración 7 Variación del nivel freático en S-02 entre el 10 y el 15 de enero de 2020...6

Ilustración 8 Variación del nivel freático en S-03 .....7

Ilustración 9 Variación del nivel freático en S-03 entre el 10 y el 15 de enero de 2020...7

Ilustración 10 Mapa hidrogeológico de permeabilidades del subsistema de Llantones. (IGME, 2009) ..... 10

Ilustración 12: Riesgos hidrogeológicos en el tramo soterrado cercano a la Ría ..... 11

Ilustración 13: Modelo de cálculo genérico..... 13

Ilustración 14: Red de flujo de agua ..... 14

Ilustración 15: Caudal de infiltración (4,5 e-07 m<sup>3</sup>/s, sub-presión en la base de la solera 0,09 MPa) ..... 14

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1: Características del punto de agua inventariado.....2

Tabla 2: Distancia de los sondeos a la Ría y variaciones mareales registradas con los minidivers instalados .....5

Tabla 3: Ensayos de permeabilidad realizados .....8

Tabla 4: Clases de Permeabilidad según Breddin (1963).....8

Tabla 5 Parámetros geotécnicos empleados en los cálculos .....13

## 1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETO

En el presente anejo se describen los diferentes aspectos de la hidrogeología del trazado de este Estudio Informativo.

En primer lugar, se describirán, de manera general, las condiciones hidrogeológicas de la traza, incidiendo espacialmente en su interacción con las aguas de la Ría. Posteriormente, se describirán los principales riesgos hidrogeológicos sobre la obra y el entorno.

Finalmente, se determinarán las posibles filtraciones de agua subterráneas en el interior de los túneles, así como las subpresiones que eventualmente podrían generarse sobar el revestimiento.

## 2.- INFORMACIÓN DISPONIBLE

Para elaborar este estudio hidrogeológico se ha recurrido además de a los datos que se han obtenido de la actual campaña hidrogeológica a la siguiente bibliografía:

- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Estudio hidrogeológico de la Cuenca Norte de España (Asturias), anejo 4: demanda de agua y vertidos.
- E. Menéndez Casares et, al. (2004). Precisiones sobre los acuíferos de la cuenca jurásica asturiana (NO de España)
- IGME. (2009). Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico- técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Actividad 4. Demarcación hidrográfica 016 Cantábrico. Masa de agua subterránea 016.204 Llantones-Pinzales-Noreña.

## 3.- HIDROGEOLOGÍA REGIONAL

Desde el punto de vista hidrogeológico regional, el sustrato afectado por el presente estudio forma parte de la Masa de Agua Subterránea (MASb) Villaviciosa (U.H. 01.19), a la que corresponde el código de identificación 016.205 del IGME. Ésta se localiza en la mitad occidental de la Demarcación, dentro de la extinta Cuenca Norte

II, todo ello dentro de la provincia de Asturias. La MASb se correspondería con el “Subsistema de Villaviciosa” del estudio del ITGE (1982). La Confederación Hidrográfica del Cantábrico diferencia la unidad de masa subterránea como 012.005 Villaviciosa (CHC, 2015).

La cota máxima dentro de la MASb 016.205 es de 722 m.s.n.m., la cota mínima se encuentra a nivel del mar (0 m.s.n.m.), situándose la cota media en 184 m.s.n.m. Por la MASb discurren varios cursos de agua, siendo el río Piles y su afluente el arroyo Peña Francia, al este de Gijón, los que se encuentran en el ámbito de estudio. El manantial más importante de la MASb es Fuente Deva, la cual surge a muro de las calizas oolíticas del miembro superior.

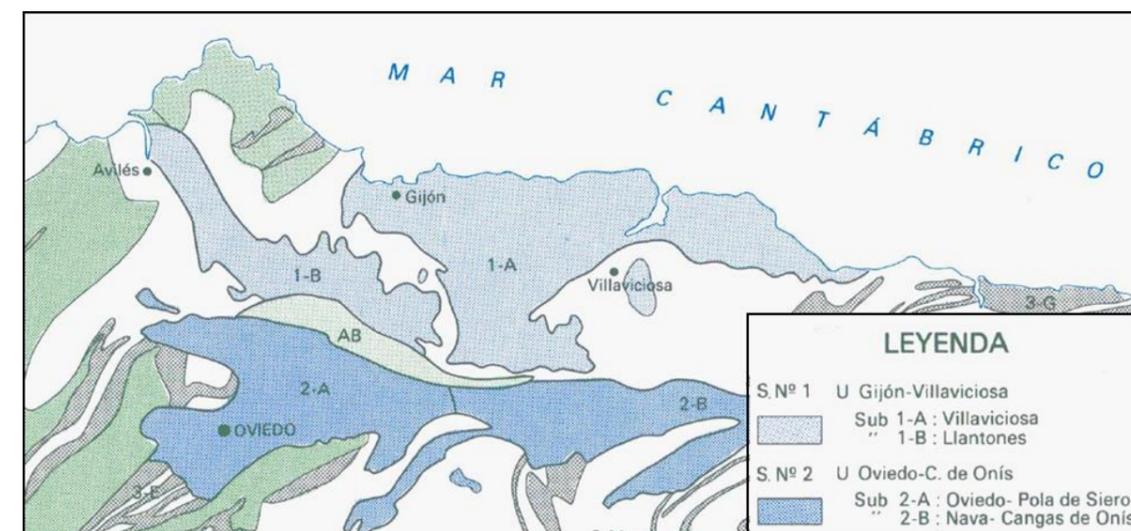


Ilustración 1: Situación de los sistemas acuíferos (A partir de A. Navarro et al., 1993)

El acuífero está en gran parte confinado, se recarga por infiltraciones de lluvia, de acuíferos jurásicos suprayacentes y de algunos ríos que lo surcan en sus tramos influentes. La descarga se produce en parte al Mar Cantábrico (salidas de la playa de San Lorenzo, por ejemplo), en parte a los ríos de la zona en los tramos en que son efluentes, así como por la explotación de sondeos para abastecimiento.

Se conoce la existencia de un manantial submarino ubicado entre la punta del Cervigón y la playa de Peñarrubia, emplazado a unos 8 metros de profundidad y compuesto por tres bocas de las que se calculaba que salían unos 8 m<sup>3</sup>/minuto de

agua dulce, existen referencias que apuntan a que antiguamente los pescadores podían servirse de su agua durante las bajamares (Blanco, 2003).

El balance hídrico del presente MASb realizado por el IGME en 1980 estima unas descargas de 6 hm<sup>3</sup>/año a través del arroyo Peña Francia (Fuente Deva) y 4 hm<sup>3</sup>/año a través del río Piles, entre otras. En 1993, el ITGE estima las salidas por Fuente Deva en 9,36 hm<sup>3</sup>/año.

#### 4.- INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

En el entorno solo hay inventariado un punto de agua, cuyas características, de acuerdo a la CH del Cantábrico, son las siguientes:

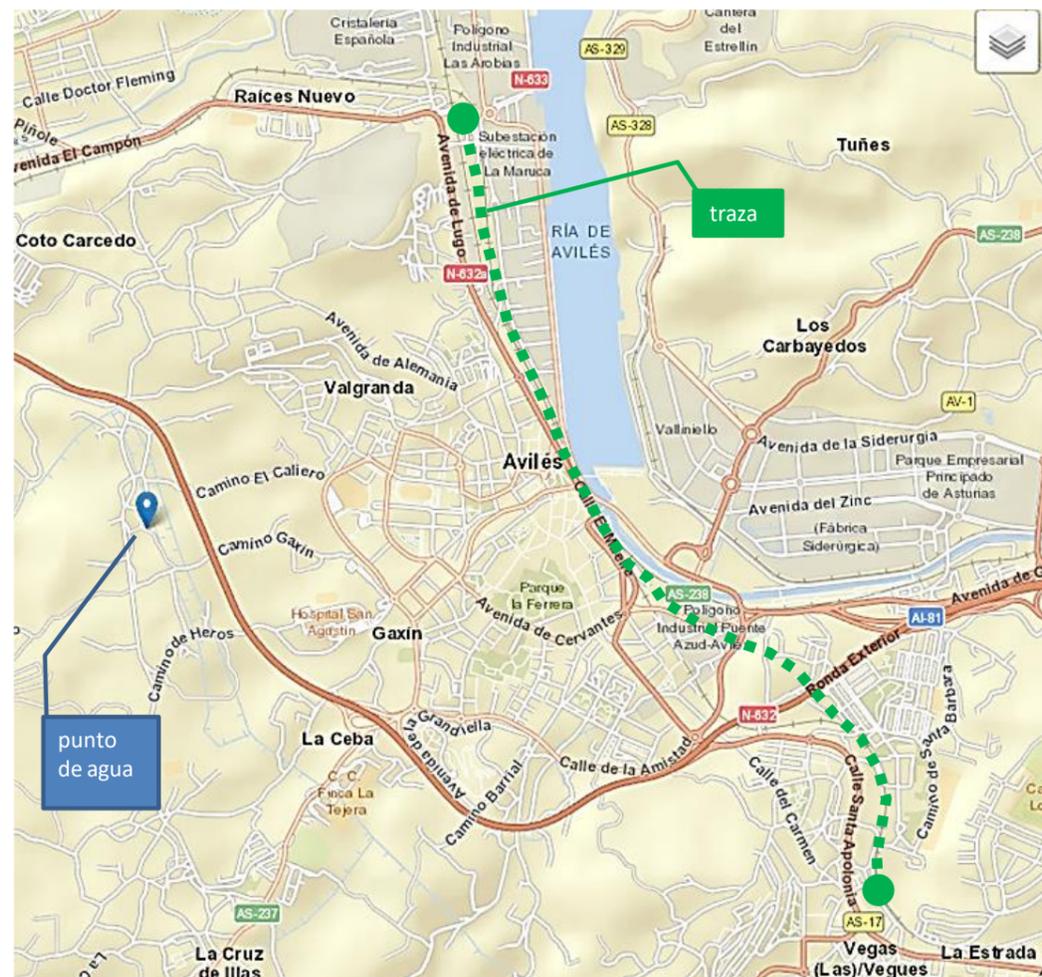


Ilustración 2: Punto de agua inventariado por CHCantabrico en el entorno de Avilés

Identificador	1203-7-0019
Naturaleza	Manantial
Cota	85 msnm
Utilización	Abastecimiento (que no sea núcleo urbano)
Perímetro de protección	No tiene
Coordenada X (ETRS89)	-5,94726425
Coordenada Y (ETRS89)	43,55585686
Sistema Acuífero	Unidades Precarboníferas
Masa de Agua	ES018Msbt012-002-somiedo-trubia

Tabla 1: Características del punto de agua inventariado

El punto inventariado es un manantial con utilización, pero queda muy alejado de la traza, por lo que no se prevén afecciones por efecto de ejecución de las obras.

#### 5.- MAREAS EN LA RÍA DE AVILÉS

Las mareas en la Ría de Avilés, van a condicionar la altura hidrostática a considerar para los cálculos de empujes en el tramo soterrado que discurre junto a la Ría. Para estimar estos empujes se va a tener en consideración lo indicado en el apartado 3.4.4.1 “Niveles de las aguas exteriores y de las líneas de saturación en terrenos naturales y rellenos” de la ROM 5.05, que dice textualmente:

*“Los niveles de agua a considerar para la obtención de los empujes de agua sobre las estructuras, que se pueden asimilar a efectos de respuesta de la obra y del terreno con un carácter estacionario, vendrán determinados por las oscilaciones de largo periodo de las aguas libres, la existencia de aportaciones subterráneas a través del terreno, la tipología estructural de la*

obra, la permeabilidad de cimientos, terrenos naturales, rellenos y obras y, en su caso, por el tipo y capacidad de los sistemas de drenaje y de otras formas de variación artificial de niveles previstos en el proyecto, así como de las tolerancias admitidas para estos casos en los Pliegos de Prescripciones Técnicas Particulares.

El ingeniero deberá fijar los niveles de agua representativos, en cada situación o estado de proyecto y para cada tipo de combinación de acciones considerado, siempre que sea posible, sobre base estadística o experimentalmente sobre todo cuando existan importantes flujos de corrientes subterráneas terrestres, presión artesisana o exposición continuada a la acción del oleaje.”

Tal como indica la ROM, es técnicamente preferible emplear datos experimentales en relación a los niveles de agua a considerar. Por esa razón, se han instalado registradores automáticos de nivel de agua (minidivers) en dos sondeos (S-02 y S03), cuyos resultados se muestran en apartados posteriores.

No obstante, la ROM aporta unas indicaciones a aplicar, que se muestran a continuación.

**Tabla 3.4.1. Desniveles límite a adoptar entre los niveles representativos de las aguas libres exteriores y las líneas de saturación en terrenos naturales o rellenos**

			Tipo de combinación de acciones				
			Quasi-permanente y sismica (S)	Fundamental y Poco Frecuente, cuando el nivel de las aguas tenga un carácter no predominante	Fundamental y Poco Frecuente, cuando el nivel de las aguas tenga un carácter predominante	Frecuente y accidental (A)	
Desniveles entre los niveles representativos de las aguas exteriores y las líneas de saturación en terrenos o rellenos	Mar con marea astronómica significativa	Permeabilidad de la obra	Baja	NAE – NM			
			Media	0,3 (PM – BM)	0,3 (PMVE – BMVE)	0,3 (PVM – BVM)	
			Alta	0,15 (PM – BM)	0,15 (PMVE – BMVE)	0,15 (PVM – BVM)	
	Mar sin marea astronómica significativa	Permeabilidad de la obra	Baja	0	NAE – NM		0
			Media	0	0,30 m		0
			Alta	0	0,15 m		0
Desniveles entre los niveles representativos de las aguas exteriores y las líneas de saturación en terrenos naturales o rellenos	Zonas con marea astronómica significativa sometidas a corrientes fluviales	Permeabilidad de la obra	Baja	NAE – (NME ó NMI)			
			Media	0,3 (carrera de marea media con nivel medio de estiaje o carrera de marea media con nivel medio de avenida, respectivamente)	0,3 (crecida o decrecida en 24 horas correspondiente a un periodo de retomo de 20 años + carrera de marea media de las mareas vivas en situación de estiaje o avenida respectivamente)	0,3 (crecida o decrecida en 24 horas correspondiente a un periodo de retomo de 50 años + carrera de marea media de las mareas vivas equinociales en situación de estiaje o avenida respectivamente)	0,3 (crecida o decrecida en 24 horas asociada a una probabilidad de no excedencia del 50 % + carrera de marea media en situación de estiaje o avenida respectivamente)
			Alta	0,15 (carrera de marea media con nivel medio de estiaje o carrera de marea media con nivel medio de avenida)	0,15 (crecida o decrecida en 24 horas correspondiente a un periodo de retomo de 20 años + carrera de marea media de las mareas vivas en situación de estiaje o avenida respectivamente)	0,15 (crecida o decrecida en 24 horas correspondiente a un periodo de retomo de 50 años + carrera de marea media de las mareas vivas equinociales en situación de estiaje o avenida respectivamente)	0,15 (crecida o decrecida en 24 horas asociada a una probabilidad de no excedencia del 50 % + carrera de marea media en situación de estiaje o avenida respectivamente)
	Corrientes fluviales no afectadas por mareas	Permeabilidad de la obra	Baja	NAE – (NME ó NMI)			
			Media	0	0,3 (crecida o decrecida en 24 horas correspondiente a un periodo de retomo de 20 años en situación de estiaje o avenida respectivamente)	0,3 (crecida o decrecida en 24 horas correspondiente a un periodo de retomo de 50 años en situación de estiaje o avenida respectivamente)	0,3 (crecida o decrecida en 24 horas asociada a una probabilidad de no excedencia del 50 % en situación de estiaje o avenida respectivamente)
			Alta	0	0,15 (crecida o decrecida en 24 horas correspondiente a un periodo de retomo de 20 años en situación de estiaje o avenida respectivamente)	0,15 (crecida o decrecida en 24 horas correspondiente a un periodo de retomo de 50 años en situación de estiaje o avenida respectivamente)	0,15 (crecida o decrecida en 24 horas asociada a una probabilidad de no excedencia del 50 % en situación de estiaje o avenida respectivamente)

**LEYENDA:** NAE: Nivel representativo de las aguas exteriores; NM: Nivel medio del mar; PM: Pleamar media; BM: Bajamar media; PMVE: Pleamar máxima viva equinoccial o máxima marea astronómica; BMVE: Bajamar mínima viva equinoccial o mínima marea astronómica; PVM: Pleamar viva media; BVM: Bajamar viva media; NME: Nivel medio en situación de estiaje en corrientes fluviales; NMI: Nivel medio en situación de avenida en corrientes fluviales.

**NOTAS:**

A los efectos de esta tabla la permeabilidad de la obra se debe calificar del modo siguiente:

Baja – Cuando la estructura es de baja permeabilidad y lo son también el relleno y/o la obra.

Alta – Cuando el relleno, la estructura y el cimiento son de alta permeabilidad.

Media – En los otros casos.

Además se utilizan las siguientes ideas relativas a la calificación de la permeabilidad:

Rellenos o terrenos naturales de alta permeabilidad: aquellos con coeficiente de permeabilidad  $k > 10^{-3}$  cm/s

Rellenos o terrenos naturales de baja permeabilidad: aquellos con coeficiente de permeabilidad  $k < 10^{-5}$  cm/s

Estructuras permeables: aquellas cuya permeabilidad no presenta interrupciones físicas que corten el flujo de agua al alcanzarse ciertas cotas (p.e. en estructuras de contención con mechinales)

A continuación, se incluyen los datos de marea publicados por la Autoridad Portuaria de Avilés, correspondientes al año 2019.

**AVILÉS**  
**CARRERAS DE MAREAS MÁXIMAS Y MÍNIMAS DE CADA MES DURANTE EL AÑO 2019**

MESES	DÍA	PLEAMARES		DÍA	BAJAMARES		CARRERA DE MAREAS METROS
		HORA min	ALTURA METROS		HORA min	ALTURA METROS	
<b>MAREAS VIVAS</b>							
ENERO	23	04:48	4,32	23	11:03	0,17	4,15
FEBRERO	21	04:33	4,42	21	10:45	0,05	4,37
MARZO	22	04:14	4,38	22	10:23	0,08	4,30
ABRIL	19	03:11	4,18	19	09:19	0,21	3,97
MAYO	19	15:51	3,94	19	21:57	0,42	3,52
JUNIO	4	16:06	3,92	4	22:19	0,50	3,42
JULIO	4	16:36	4,06	4	22:52	0,34	3,72
AGOSTO	31	16:02	4,36	31	22:16	0,09	4,27
SEPTIEMBRE	1	16:48	4,36	1	23:01	0,15	4,21
OCTUBRE	28	15:24	4,20	28	21:31	0,31	3,89
NOVIEMBRE	27	03:27	3,96	27	09:33	0,48	3,48
DECEMBER	27	03:56	3,88	27	10:07	0,63	3,25
<b>MAREAS MUERTAS</b>							
ENERO	14	21:25	3,04	15	03:31	1,57	1,47
FEBRERO	28	11:15	2,93	28	17:21	1,61	1,32
MARZO	29	10:35	2,83	29	16:43	1,69	1,14
ABRIL	27	09:47	2,81	27	15:56	1,68	1,13
MAYO	27	10:09	2,86	27	16:16	1,60	1,26
JUNIO	25	09:04	2,94	25	15:10	1,53	1,41
JULIO	26	10:06	3,03	26	16:15	1,54	1,49
AGOSTO	24	09:05	3,06	24	15:20	1,56	1,50
SEPTIEMBRE	7	22:47	2,93	8	04:51	1,62	1,31
OCTUBRE	6	22:18	2,82	7	04:21	1,73	1,09
NOVIEMBRE	4	21:33	2,81	5	03:37	1,73	1,08
DECEMBER	4	21:50	2,85	5	03:55	1,69	1,16

Ilustración 3: Datos de carreras de marea en el Puerto de Avilés (Año 2019)

Mediante estos criterios, y los datos experimentales obtenidos en la campaña, se abordará la decisión del nivel hidrostático a aplicar, en la alternativa de trazado adoptada en esta Fase II.

**6.- CAMPAÑA HIDROGEOLÓGICA REALIZADA**

Con el fin de complementar la información disponible de otros proyectos y estudios para el presente Estudio, se ejecutó una campaña hidrogeológica para observar las fluctuaciones del nivel freático a lo largo del trazado y medir la permeabilidad del terreno.

**6.1.- POSICIÓN DEL NIVEL FREÁTICO**

Como se ha indicado en apartados anteriores, al finalizar la campaña de sondeos se instalaron en los mismos unos registradores continuos (minidivers, en los sondeos S-02 y S-03) para medir la temperatura y la presión del agua (e indirectamente la altura de agua en sondeo), programados para realizar las mediciones cada hora. Estos registradores fueron colocados el 27 de diciembre de 2019, a 8,15 m de profundidad en S-02 y 8,05 m de profundidad en S-03 y comenzaron a medir a las 12 horas de ese mismo día. Del mismo modo fueron extraídos con fecha 12 de junio de 2020 para obtener las primeras lecturas, que se han tenido en cuenta en este momento para este avance de la campaña hidrogeológica.

En el croquis que se muestra a continuación se indica la distancia de cada uno de estos sondeos en relación a la ría:



Ilustración 4: Posición del sondeo S-02 en relación a la Ría de Avilés (88 m de distancia entre sondeo y Ría)



Ilustración 5: Posición del sondeo S-03 en relación a la Ría de Avilés (33 m de distancia entre sondeo y Ría)

Las distancias a la Ría de estos sondeos resultan ser:

- Al sondeo S-02: 88 m
- Al sondeo S-03: 33 m

Uno de los objetivos de estos sondeos era observar las fluctuaciones del nivel freático para ver si había influencia de las mareas. Procesando los datos de estas primeras lecturas, se ha observado que en S-02 no hay apenas influencia de las mareas, y se ha determinado que esta variación del nivel freático asciende a 20 cm como máximo cada 6 horas, siendo los ascensos y descensos del mismo muy graduales. En el Gráfico 5 esto se hace evidente, ya que se ha enfrentado la altura de la columna de agua frente al tiempo (horas) entre en 10 y el 15 de enero de 2020, para obtener cierto detalle. Sin embargo, si enfrentamos la altura de la columna de agua con el tiempo (días/mes/año) en este sondeo durante todo el periodo de las

primeras lecturas (Gráfico 4) se puede ver que el nivel freático se mantiene prácticamente constante a lo largo del tiempo.

Mientras, en el S-03, el nivel freático llega a variar hasta 1,6 metros cada 6 horas, lo que demuestra que las mareas sí tienen gran influencia en este punto. Observando el Gráfico 6 que representa en S-03 la altura de la columna de agua con el tiempo (día/mes/año), se puede ver claramente la variación, creando una forma ondulada muy pronunciada que evidencia, por tanto, la influencia de las mareas.

Para verlo más claramente se han tomado solo una pequeña serie de datos (del 10 de enero de 2020 al 15 de enero del 2020) y se ha generado el mismo tipo de gráfico (Gráfico 7).

En resumen, los resultados obtenidos en relación a la influencia de las mareas en estos sondeos son los siguientes:

SONDEO	DISTANCIA A LA RÍA	VARIACIÓN MAREAL
S-02	88 m	0,2 m
S-03	33 m	1,6 m

Tabla 2: Distancia de los sondeos a la Ría y variaciones mareales registradas con los minidivers instalados

Los datos son coherentes, pues a mayor distancia del sondeo a la Ría, menor es el nivel de fluctuación del nivel de agua por efecto de las mareas.

En los datos de mareas proporcionados por el Puerto de Avilés durante esos mismos periodos de medición se registran carreras de mareas muertas en torno a 3 m y vivas en torno a 4 m. Por tanto, puede concluirse que, si bien en los sondeos se aprecia cierto efecto de variación del nivel por efecto de las mareas, al estar tierra adentro los sondeos, el efecto se encuentra muy amortiguado, obteniéndose una carrera de marea un 50 % inferior en el sondeo S-03 (el más próximo) y de apenas un 5 % en el sondeo S-02 (el más alejado).

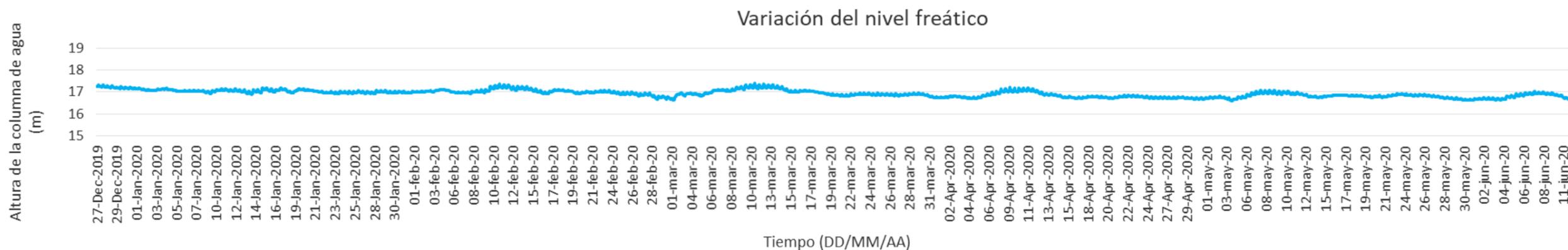


Ilustración 6 Variación del nivel freático en S-02

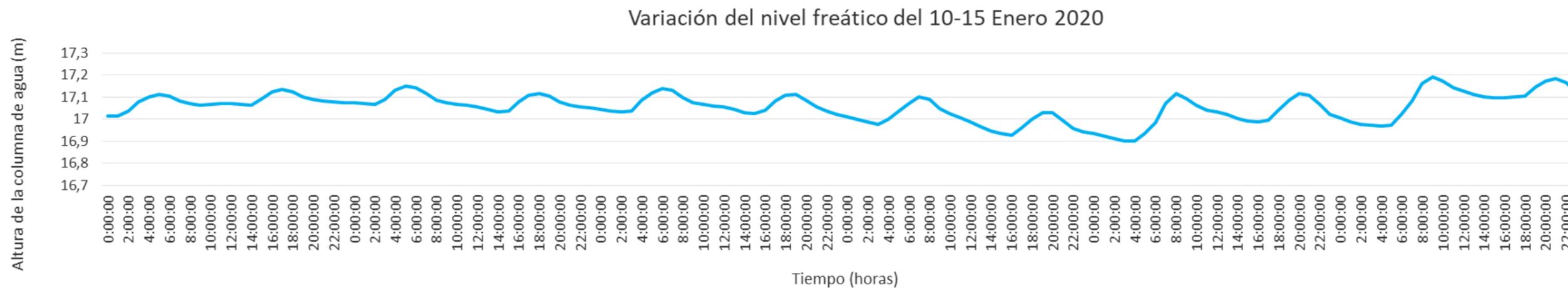


Ilustración 7 Variación del nivel freático en S-02 entre el 10 y el 15 de enero de 2020.

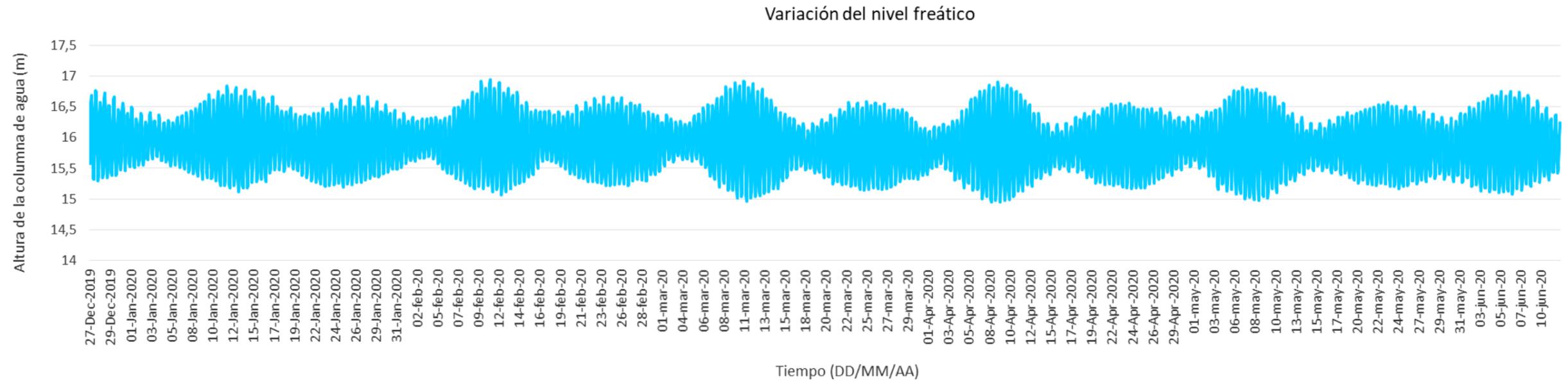


Ilustración 8 Variación del nivel freático en S-03

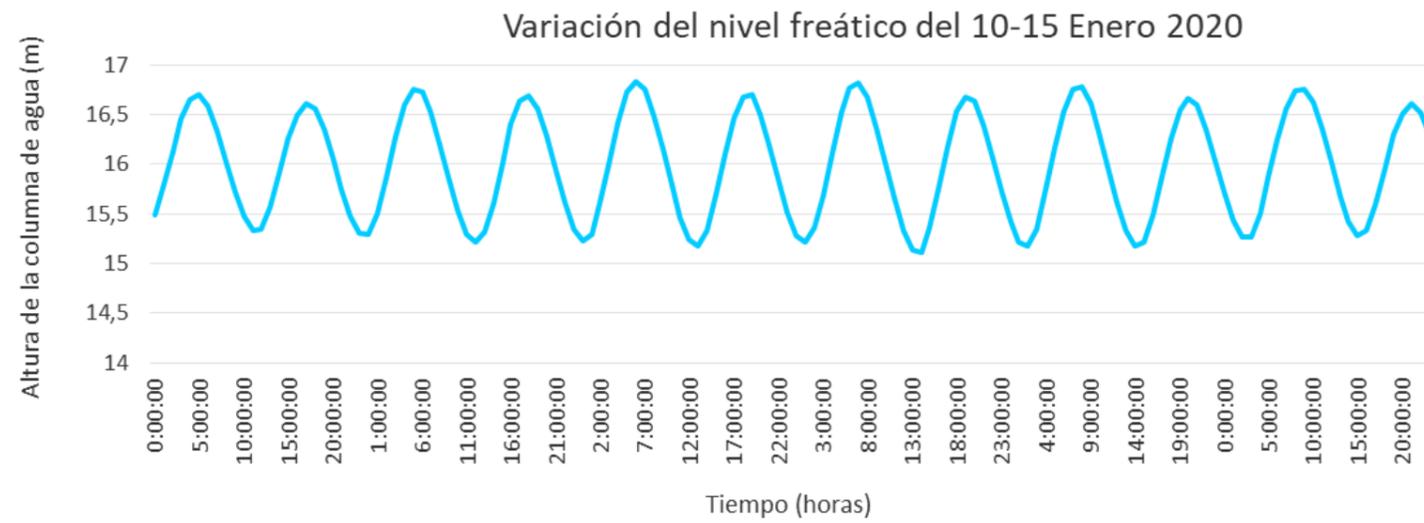


Ilustración 9 Variación del nivel freático en S-03 entre el 10 y el 15 de enero de 2020.

## 6.2.- PERMEABILIDAD

En los sondeos perforados se han realizado ensayos de permeabilidad. En los terrenos tipo suelo, los ensayos fueron de tipo “Lefranc de Carga Variable”, mientras que en roca fueron “Lugeon”. Los valores de permeabilidad obtenidos fueron los siguientes:

SONDEO	PROF.(m)	TIPO	TERRENO	PERMEABILIDAD
S-2	6,6 m	LEFRANC	Limo arenoso	$1,03 \cdot 10^{-5}$ m/s
S-2	12,25 m	LEFRANC	Margas pardo-marrón	$6,36 \cdot 10^{-6}$ m/s
S-3	6,6 m	LEFRANC	Arcillas ocre	$1,40 \cdot 10^{-6}$ m/s
S-3	13,25 m	LEFRANC	Arcillas marrones	$7,07 \cdot 10^{-5}$ m/s
S-2	24,65 m	LUGEON	Margas	1,9 Lu = $1,9 \cdot 10^{-7}$ m/s
S-1	18,00 m	LUGEON	Calizas	18,5 Lu = $18,5 \cdot 10^{-7}$ m/s
S-1	42 m	LUGEON	Margas	8,00 Lu = $8 \cdot 10^{-7}$ m/s

Tabla 3: Ensayos de permeabilidad realizados

Los estadillos de estas pruebas de permeabilidad pueden consultarse en el ANEJO 4 (Geología y Geotecnia).

Estos valores de permeabilidad permiten valorar la clase de permeabilidad y calidad del acuífero, de acuerdo al criterio de Breddin (1963):

CLASIFICACIÓN DE BREDDIN (1963)			
CLASE	PERMEABILIDAD	CLASE DE ACUÍFERO	CLASE DE PERMEABILIDAD
	m/s		
1	$3 \cdot 10^{-2}$	Muy Bueno	Muy Alta
2	$7 \cdot 10^{-3}$	Muy Bueno	Muy Alta
3	$1 \cdot 10^{-3}$	Bueno	Alta
4	$5 \cdot 10^{-4}$	Regular	Media
5	$9 \cdot 10^{-5}$	Pobre	Pequeña
6	$5 \cdot 10^{-5}$	Pobre	Pequeña
7	$2 \cdot 10^{-5}$	Muy Pobre	Muy Pequeña
8	$7 \cdot 10^{-6}$	Muy Pobre	Muy Pequeña
9	$7 \cdot 10^{-7}$	Impermeable	Practicamente Impermeable
10	$1 \cdot 10^{-7}$	Impermeable	Practicamente Impermeable
11	$< 1 \cdot 10^{-7}$	Impermeable	Practicamente Impermeable
12	$<< 1 \cdot 10^{-7}$	Impermeable	Practicamente Impermeable

Tabla 4: Clases de Permeabilidad según Breddin (1963)

De acuerdo a la anterior tabla:

- Los suelos superficiales limo arcillosos (Depósitos Aluviales y de Ría), presentan rangos de permeabilidades entre  $1 \cdot 10^{-5}$  y  $7 \cdot 10^{-5}$  m/s, que sitúan estos materiales en el entorno de la Clase 7, constituyendo un acuífero “Muy Pobre” con permeabilidad “Muy Pequeña”. Esta permeabilidad no es muy elevada, pero constituyen capas que no son impermeables y que permiten la circulación de agua. Esto se constata con claridad en el sondeo S02 y S03, en los que la carrera de marea se amortigua entre un 5 y 50 % por efecto de esa baja permeabilidad.
- Las dolomías, calizas y margas (Jurásico), presentan rangos de permeabilidades del orden de  $10^{-7}$  m/s. Esto provoca que se traten de acuíferos y terrenos impermeables.

## 7.- HIDROGEOLOGÍA SUBTERRÁNEA

Los principales acuíferos de Avilés pertenecen al subsistema de Llantones, que abarca no solo el municipio de Avilés sino poblaciones como Campañones, Peñaferruz, Aveno y Vega. Según IGME, 2009 este subsistema derive su alimentación procedente de la lluvia útil ( $49 \text{ hm}^3/\text{año}$ ) esencialmente, y una cantidad menor de ríos que se infiltran. Las salidas se producen a través de los ríos y arroyos que la cruzan, unos  $24 \text{ hm}^3/\text{año}$ , incluido el río Alvares; el más importante cerca de Avilés.

En el área de estudio se pueden distinguir principalmente dos tipos de acuíferos: acuíferos porosos (en gravas, arenas, areniscas...) y acuíferos kársticos y fisurados cuya permeabilidad tiene origen mecánico o de disolución en fisuras previas. En función de esto se pueden caracterizar los materiales y dividirlos en:

- Porosidad intergranular (Conglomerados Dogger, areniscas del Keuper, Cuaternarios y rellenos antrópicos)
- Fisuración y karstificación (Calizas y dolomías del Lías)

Los materiales que presentan mejores condiciones hidrogeológicas son los materiales carbonáticos, que forman los acuíferos de mayor importancia, debido a la fisuración y karstificación, que permite la circulación de agua. Los materiales detríticos también presentan buenas condiciones hidrogeológicas, a pesar de no constituir la principal masa de agua subterránea. Los materiales del dogger son permeables, por lo que el agua penetra y circula mientras se ve confinada por los depósitos arcillosos Triásicos.

Con esto, podemos concluir que existen dos litologías principales que forman los acuíferos de mayor importancia:

- Dolomías, calizas y margas (Jurásico).
- Depósitos aluviales y de ría (Cuaternario)

#### **Dolomías, calizas y margas.**

Como bien se explica en el anejo 04: Geología, geotecnia y estudio de materiales, esta unidad corresponde principalmente a una alternancia de calizas, dolomías y margas que a rasgos generales presentan tonalidad gris. Aparecen altamente fracturadas, karstificadas y meteorizadas en los primeros 15 metros, dando lugar a cavidades capaces de almacenar y transmitir agua. Posteriormente y conforme se profundiza, la fracturación y karstificación disminuye considerablemente, llegando a presentarse como calizas y dolomías sanas. Se encuentran en alternancia con margas de color gris y pardo y arcillas, estando a base intercaladas ocasionalmente con niveles yesíferos, que podrían suponer un tránsito a las facies Keuper.

En el sondeo S-01, ubicado en el monte de Bustiello se han realizado dos ensayos Lugeon a los 18 y los 42 metros de profundidad. Con dichos ensayos se ha determinado la permeabilidad y se ha visto que las calizas poseen una permeabilidad mayor que las margas, siendo estas últimas las que actúan como nivel impermeable y permiten también el almacenamiento de agua. El acuífero formado por las calizas y dolomías es el más importante, denominándose “Acuífero Jurásico Calcáreo”.

#### **Depósitos aluviales y de ría.**

Estos depósitos corresponden a arenas finas, arenas limosas, limos y arcillas con cantos de cuarzo y caliza ocasionales y niveles de gravas, esencialmente de cuarzo, que llegan a alcanzar los 11 cm. En ocasiones poseen niveles de arcillas negras con abundante materia orgánica.

La permeabilidad de estos depósitos se debe a la porosidad intergranular esencialmente. Se han hecho diversos ensayos Lefranc en los sondeos S-2 y S-3 del actual proyecto, por medio de los cuales se han obtenido las permeabilidades de estos depósitos aluviales y de ría. Se ha determinado que los niveles con más cantidad en arenas y gravas son los que poseen una mayor permeabilidad, mientras que los niveles con mayor contenido en limos y arcillas son más impermeables. En la ilustración 3 podemos ver el mapa hidrogeológico en función de las permeabilidades de todo el subsistema de Llantones.

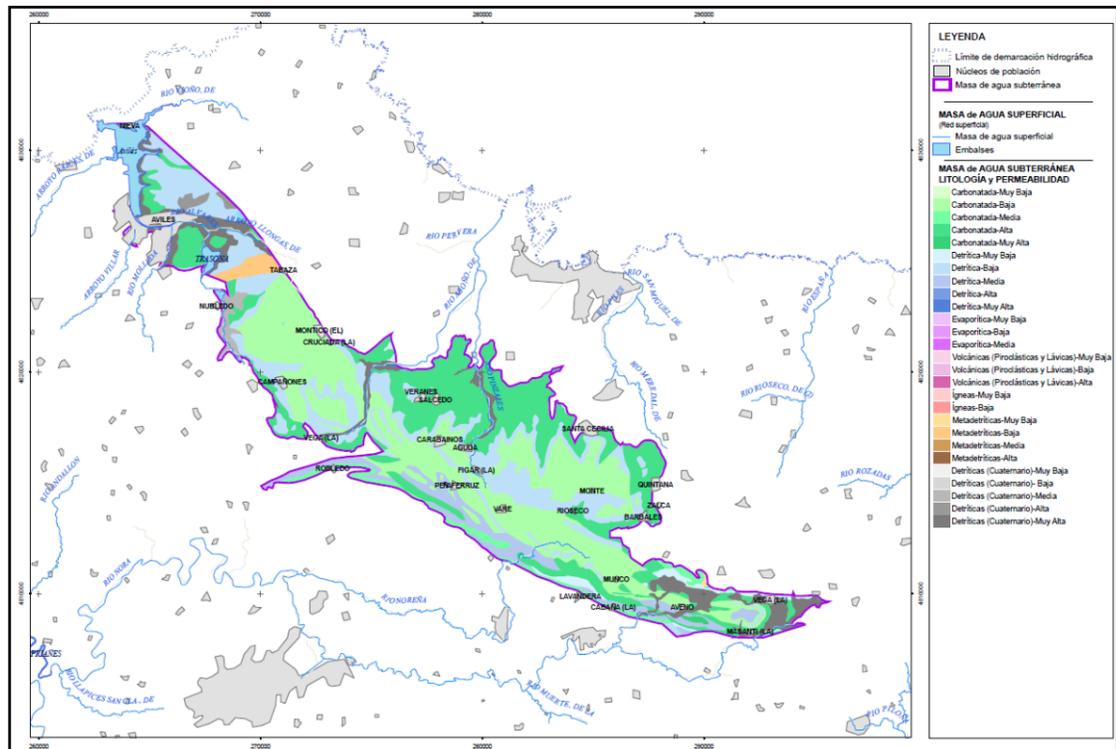


Ilustración 10 Mapa hidrogeológico de permeabilidades del subsistema de Llantones. (IGME, 2009)

En el entorno de la ría existe un nivel freático que lógicamente aparecerá relacionado con el nivel de agua de la ría de Avilés. Este nivel, a su vez aparecerá sometido a las variaciones ocasionadas por las mareas.

## 8.- RIESGOS Y CONDICIONANTES HIDROGEOLÓGICOS

A lo Largo de la traza de estudio, se van a localizar dos acuíferos principales:

- El acuífero conformado por Dolomias-Calizas-Margas, que se interceptará principalmente en el túnel en mina de Bustiello (PK aproximado 1+500)
- El acuífero de los depósitos aluviales y de Ría, que se interceptará en la mitad final soterrada del trazado, en el casco urbano de Avilés (Desde PK 1+800 en adelante).

En el **Túnel en Mina de Bustiello**, el terreno es rocoso (Dolomías, Calizas y Margas), presentando una permeabilidad del orden de  $10^{-7}$  m/s medida mediante ensayos Lugeon en la campaña realizada para este estudio. Este valor numérico permite clasificar el terreno alrededor del túnel como impermeable.

Por otro lado, de acuerdo a los datos obtenidos en sondeo, el nivel piezométrico se sitúa muy bajo en esta zona, por debajo de la cota del túnel, por lo que no se espera que se produzcan filtraciones sistemáticas al túnel, ni afecciones al acuífero, en la alternativa considerada dentro de esta Fase II.

En los **tramos soterrados** que se planifican en el entorno del **núcleo urbano de Avilés**, se localiza el otro punto de potencial impacto hidrogeológico. En esta zona se localiza el acuífero de los depósitos aluviales y de Ría. Tal como se observa en los sondeos realizados, el nivel piezométrico del agua se encuentra muy condicionado por el nivel de la misma en la Ría. Este nivel varía con el régimen de mareas, tal como se ha puesto de manifiesto en los registradores (Minidivers) instalados en los sondeos S-2 y S-3, oscilando aproximadamente un metro entre la pleamar y la bajamar.

En este acuífero, la permeabilidad es del orden de  $10^{-5}$  m/s, que se categoriza como “muy pequeña”, pero que dada la altura del nivel piezométrico (cota de la Ría), y la inagotable fuente de agua que lo alimenta, asegura filtraciones y subpresiones en cualquier soterramiento que se ejecute a bajo la Ría.

En esta zona cercana a la Ría, la traza discurre a muy poca profundidad. Por ello, para ejecutar el soterramiento, se emplearía un túnel entre pantallas, que estaría total o parcialmente bajo el nivel piezométrico. Los riesgos hidrogeológicos asociados a la situación descrita son principalmente dos:

- RIESGO 1: Filtraciones y subpresiones. Dada la permeabilidad del terreno y la cota del nivel freático, existe potencial para que se produzca infiltraciones de agua sistemáticas y permanentes al interior del túnel, así como subpresiones en solera.

- **RIESGO 2: Efecto Barrera.** Antes de ejecutar el soterramiento, existiría un flujo subterráneo de agua, que bajo el caso urbano de Avilés llevaría el agua de esta zona hacia la Ría. Este flujo es facilitado por la red de arroyos existente, que es perpendicular a la Ría. Si se interrumpe el flujo con una gran obra lineal continua que va paralela a la Ría, el agua tiende a acumularse "Aguas Arriba" del flujo subterráneo original, subiendo la cota del nivel piezométrico desde las pantallas, lo que potencialmente puede provocar afecciones a edificaciones y especialmente a sus sótanos. Esta situación se ilustra en el croquis adjunto.

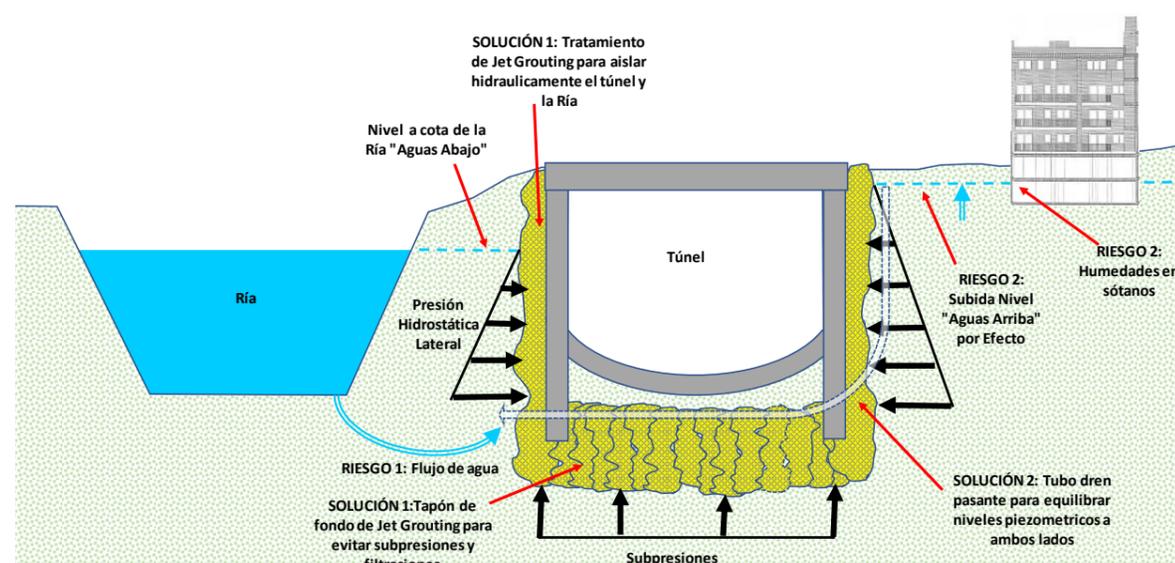


Ilustración 11: Riesgos hidrogeológicos en el tramo soterrado cercano a la Ría

Para evitar estos riesgos existen dos soluciones muy contrastadas, que resuelven eficazmente el problema:

La solución al Riesgo 1 (Filtraciones y subpresiones), podría venir de la ejecución de barreras y tapones de fondo ejecutados con "Jet Grouting", que se prepararían antes de la ejecución de las pantallas. Este tratamiento del terreno, impermeabiliza el terreno, impidiendo la conexión hidráulica entre la Ría y el Túnel.

La Solución al Riesgo 2, pasa por realizar unos drenajes pasantes, desde un lado del soterramiento al otro, que podrían hacerse por debajo de la solera (sifones). No se dispone aún de datos suficientes para dimensionar el espaciado de esta sifones, lo cual deberá abordarse en la fase de proyecto, a partir de nuevos ensayos, piezómetros y modelos numéricos.

En la **zona del Apeadero de la Rocica** el nivel freático se encuentra muy bajo, a cota de la losa inferior, por lo que no se consideran riesgos hidrogeológicos de ningún tipo.

## 9.- DISEÑO DE LOS SIFONES

### 9.1.- Introducción

Como se ha visto anteriormente, la medida compensatoria para minimizar el efecto barrera consiste en la ejecución de sifones que permiten reducir gradientes hidráulicos mediante un sistema de By Pass.

Dadas las particularidades de este sistema, es necesario describir en detalle las características del mismo con objeto de que su funcionamiento sea óptimo.

El sistema denominado "sifón" se basa en una serie de elementos constructivos. Se van a analizar estos elementos en detalle:

- Pozos colector del flujo subterráneo, situado en la zona exterior de la pantalla situada aguas arriba según el flujo subterráneo.
- Tubería de paso inferior a la obra.
- Pozos de recarga del flujo subterráneo, situado en la zona exterior de la pantalla situada aguas abajo según el flujo subterráneo.

## 9.2.- Características constructivas

El proceso común de diseño de un pozo va desde el interior hacia el exterior, es decir, desde el diámetro de entubación hasta el de perforación. Esto se debe a que el diámetro interior suele ser la principal limitación a la hora de realizar instalaciones.

Los materiales de construcción suponen en ocasiones límites constructivos, y deben de ser planificados con antelación en función a las características del agua y del uso que se le vaya a dar al pozo, aspectos que también se deben tener en consideración.

Por otra parte, las especificaciones de la tubería, no sólo dependen del tipo de agua y uso requerido para el pozo, ya que el tipo y tamaño del ranurado varía según el tipo de filtro (engravillado) que se instale.

Atendiendo a estos criterios se describen a continuación los diferentes elementos constructivos.

### 9.2.1.- Engravillado

El engravillado actúa como filtro y tienen como objetivo impedir el acceso de las partículas más finas en el pozo, favoreciendo la estabilidad de la formación geológica en el entorno de la perforación (al impedir problemas de dispersibilidad de finos, pérdida de material fino por erosión interna o tubificación) y limitando el problema de la colmatación física, que reduciría notablemente la eficacia de estas instalaciones. Por otra parte, el engravillado debe ser resistente a los posibles tratamientos que se someta el pozo a lo largo de su vida (como los reactivos utilizados para eliminar incrustaciones). De igual manera, debe realizarse con un material que evite en la medida de lo posible las reacciones con el agua del acuífero (evitar la colmatación química).

### 9.2.2.- Entubación

Con el fin de evitar problemas de corrosión y de colmatación química se propone PVC-U como material de construcción para las tuberías de revestimiento.

### 9.2.3.- Perforación

El diámetro de la perforación debe de tener en cuenta el anillo que quedará entre el diámetro exterior de la entubación y el de la perforación para que el paquete filtrante de grava quede bien emplazado y realice su cometido correctamente.

Se recomienda un espacio anular mínimo de entre 8 y 20 cm.

El diámetro de perforación según este criterio estaría por tanto entre 490 y 730 mm. Por lo tanto, de acuerdo con los diámetros de perforación empleados en obra, 700 y 850 mm, se recomienda un diámetro de 700 mm.

Por otro lado, los pozos tendrán una profundidad suficiente para entroncar con las tuberías inferiores del By Pass o sifón de forma directa, o bien para entroncarlas de forma indirecta por el interior del túnel.

### 9.2.4.- Limpieza del pozo

Para llevar a cabo la limpieza del pozo mediante aire comprimido es preciso calcular la sumergencia de la tubería por donde circulará el aire a presión y, por tanto, de la tubería de elevación, por donde saldrá la mezcla agua y aire.

Será necesario prever un compresor adecuado a las características de caudal de limpieza, profundidad del nivel freático, depresión deseada en el pozo, sumergencia, etc., así como una tubería de impulsión capaz de evacuar el caudal necesario a una velocidad inferior a 2 m/s.

### 9.2.5.- Desinfección del pozo

La desinfección del pozo pretende eliminar la contaminación microbiológica existente, ya que ésta puede ser origen de colmatación biológica. Para ello se introduce en el pozo una solución desinfectante que elimina los microorganismos, siendo preciso proceder a una limpieza posterior mediante aire a presión para extraer el producto adicionado y los restos orgánicos

**9.3.- Labores de mantenimiento**

Durante la fase de explotación de la obra será preciso llevar a cabo ciertas labores de mantenimiento de los pozos, con el objetivo de que no pierdan eficacia como consecuencia de problemas de colmatación física, incrustaciones (colmatación química) o colmatación biológica.

A continuación se indican unas recomendaciones para el mantenimiento de los pozos.

ACTUACIONES	CADENCIA DE EJECUCIÓN
Bombeo mediante motobomba sumergida de 10 l/s durante 24 horas con control piezométrico	1 limpieza cada 2 meses
Tratamiento con polifosfatos	1 tratamiento cada 3 meses
Registro de vídeo-televisión para inspección de las tuberías y estado general del pozo	1 registro cada 6 meses
Eliminación del "cake" con polifosfatos.	1 tratamiento al finalizar la ejecución del sondeo y en función de prescripción tras reconocimiento por video-televisión

**10.- ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO NUMÉRICO DEL TRAMO SOTERRADO**

Como se ha indicado, en el tramo soterrado, el túnel discurre en paralelo a la vía, en terreno completamente saturado, con un nivel freático muy elevado. Dado que el terreno predominante en el soterramiento es aluvial, las posibilidades de filtraciones de agua al túnel son muy elevadas. Por esta razón, se ha definido un tratamiento de jet grouting en hastiales y solera, cuyo objetivo principal es evitar filtraciones al túnel.

En este apartado, se ha realizado un cálculo de infiltraciones al túnel, empleando software de elementos finitos, que ha permitido determinar los niveles de filtraciones que se van a dar en el túnel soterrado. El modelo realizado es genérico, no correspondiendo a ningún PK específico, pero refleja todas las características hidrogeológicas del problema.

El modelo empleado es el siguiente:

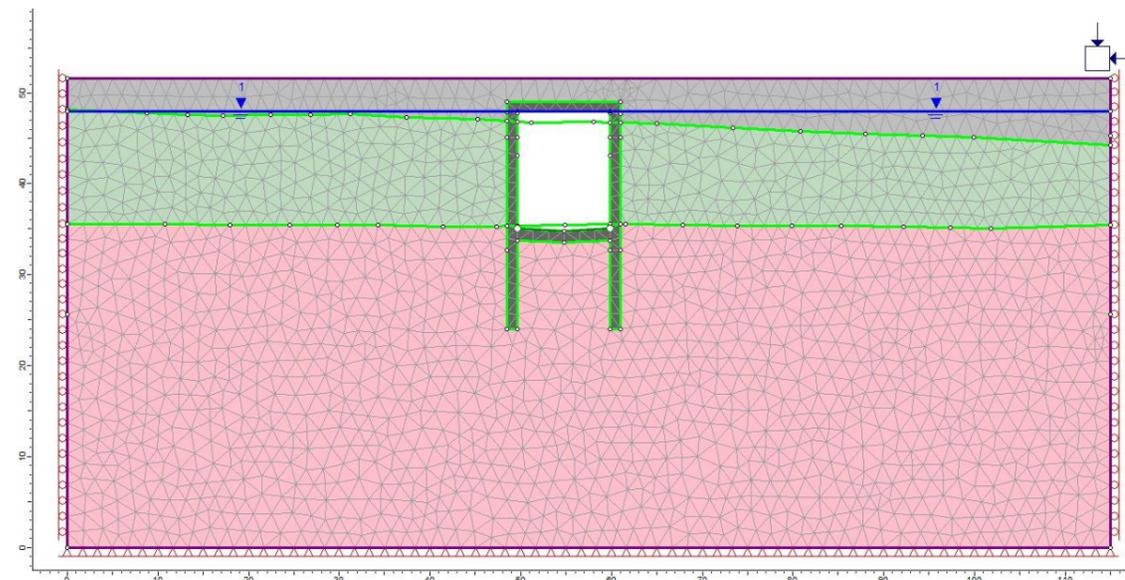


Ilustración 12: Modelo de cálculo genérico

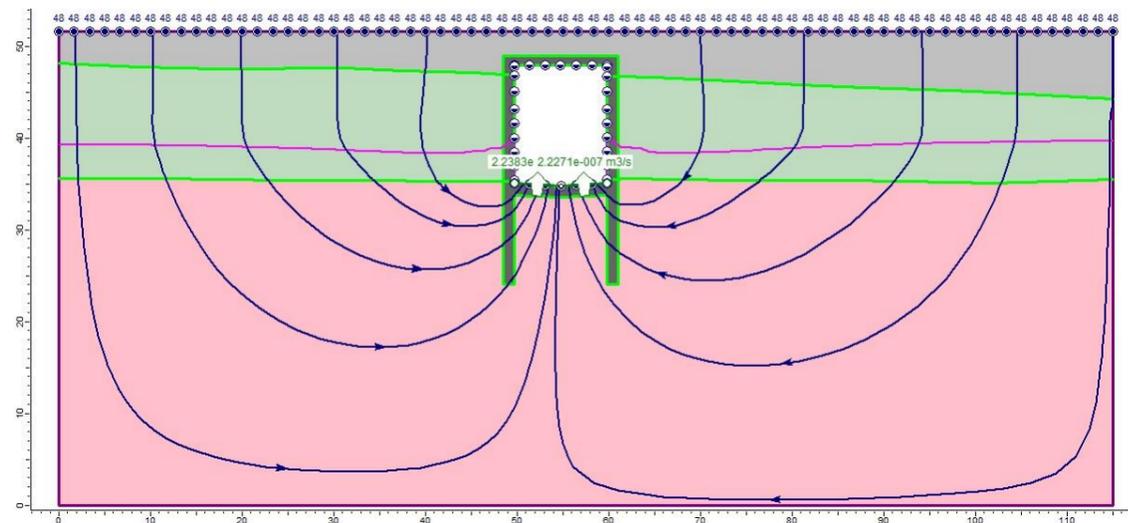
De acuerdo a datos bibliográficos y a los ensayos realizados, los parámetros geotécnicos y de permeabilidad considerados se muestran en la siguiente tabla:

	PESO ESPECÍFICO (kN/m³)	PERMEABILIDAD (m/s)
Qa (rellenos antrópicos)	17,1	$\cdot 10^{-5}$
Qr (sedimentos de ría)	17,8	$\cdot 10^{-5}$
T (Conglomerados)	20,1	$\cdot 10^{-5}$ *
HORMIGÓN	23	$\cdot 10^{-8}$

\*Aunque los resultados obtenidos en los sondeos dan permeabilidades más altas se ha optado por la adopción de un valor de permeabilidad menor para estar del lado de la seguridad.

Tabla 5 Parámetros geotécnicos empleados en los cálculos

Las fases de cálculo y los resultados obtenidos son los siguientes:



En cuanto al efecto barrera, es de esperar que este se produzca con la construcción del soterramiento propuesto en la presente actuación, no obstante, se considera que con las medidas propuestas (sifones) este efecto se mitigaría en gran medida, aunque esta cuestión deberá ser abordada en más detalle en fase de proyecto constructivo.

Ilustración 13: Red de flujo de agua

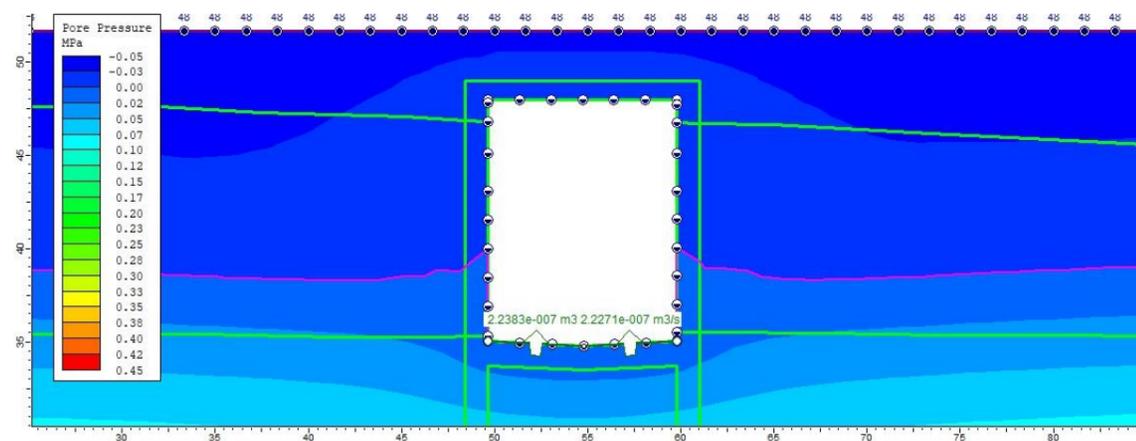


Ilustración 14: Caudal de infiltración ( $4,5 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ , sub-presión en la base de la solera  $0,09 \text{ MPa}$ )

Como se comprueba en los gráficos anteriores, el caudal infiltrado es de valor  $4,5 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{día}$ , lo cual es prácticamente impermeable, y avala la solución constructiva propuesta. Además, se ha obtenido un valor de sub-presión en la base de la solera de  $0,09 \text{ MPa}$ .