

## JORNADA TÉCNICA TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

Bilbao, 13, 14 y 15 de Junio de 2011

# Los túneles de Udalaitz y su interacción con el medio hidrogeológico

Jefe de Gabinete de Geología y Geotecnia  
Dirección de Estudios/Dirección de Estudios y Proyectos  
Dirección General de Grandes Proyectos



Patrocinado por



EUSKADIKO PORTU, UBIDE ETA  
BIDEETAKO INGENIARIEN KOLEGIOA  
COLEGIO DE INGENIEROS DE CAMINOS,  
CANALES Y PUERTOS DEL PAÍS VASCO



Euskadiko Geologoen  
Elkargo Ofiziala  
Ilustre Colegio Oficial de  
Geólogos del País Vasco

## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO



- Consultor principal:



## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Contenido de la presentación

1. Descripción de las obras.
2. Marco geológico e hidrogeológico. Planteamiento del problema.
3. Descripción de los trabajos realizados.
4. Funcionamiento hidrogeológico.
5. Interacción túnel-medio hidrogeológico.
  - 5.1. Conocimiento preconstrutivo.
  - 5.2. Excavación desde la boca sur del túnel Mondragón-Elorrio.
6. Conclusiones.



# Los túneles de Udalaiz y su interacción con el medio hidrogeológico

## 1. Descripción de la obra.





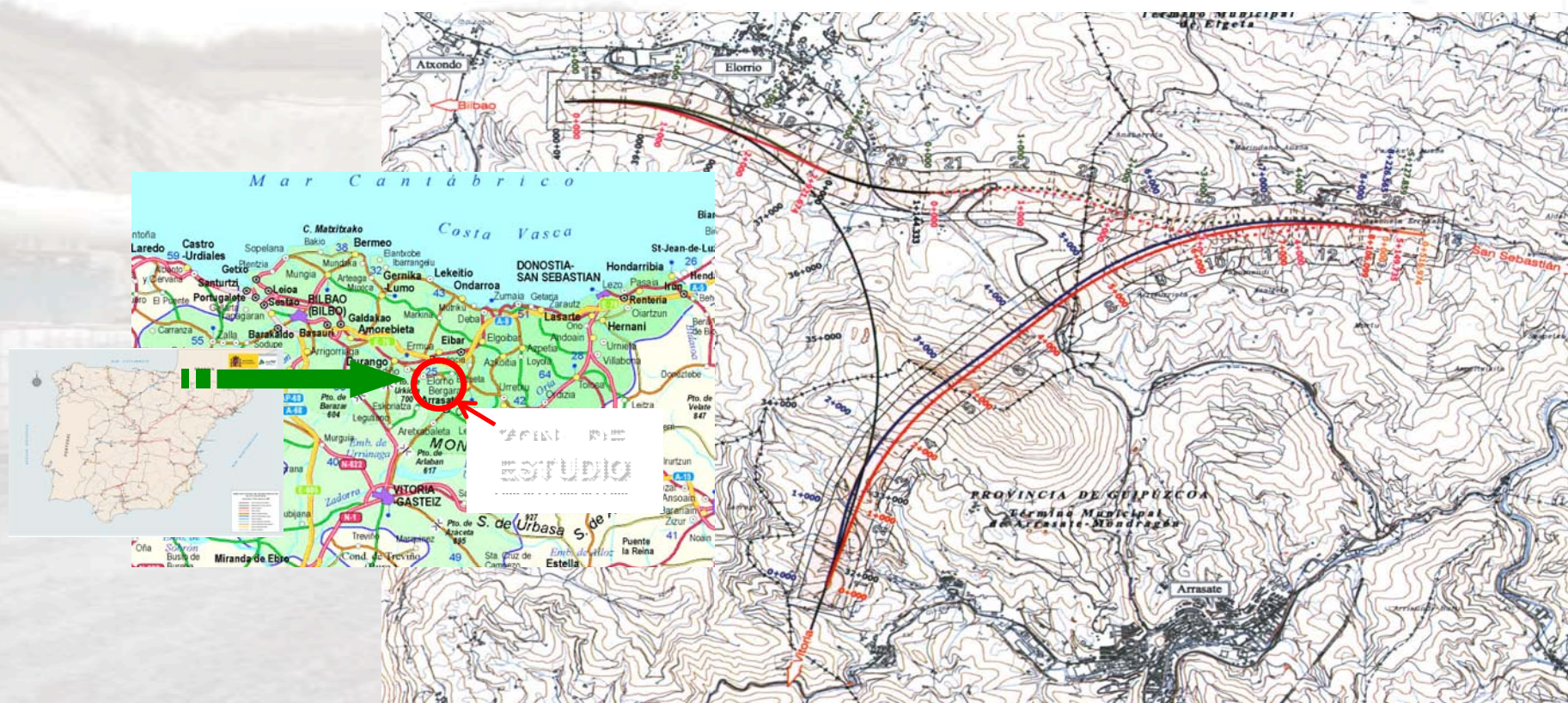
# Los túneles de Udalaitz y su interacción con el medio hidrogeológico

Jefe de Gabinete de Geología y Geotecnia

ADIF

## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Ubicación de las obras.



Patrocinado por



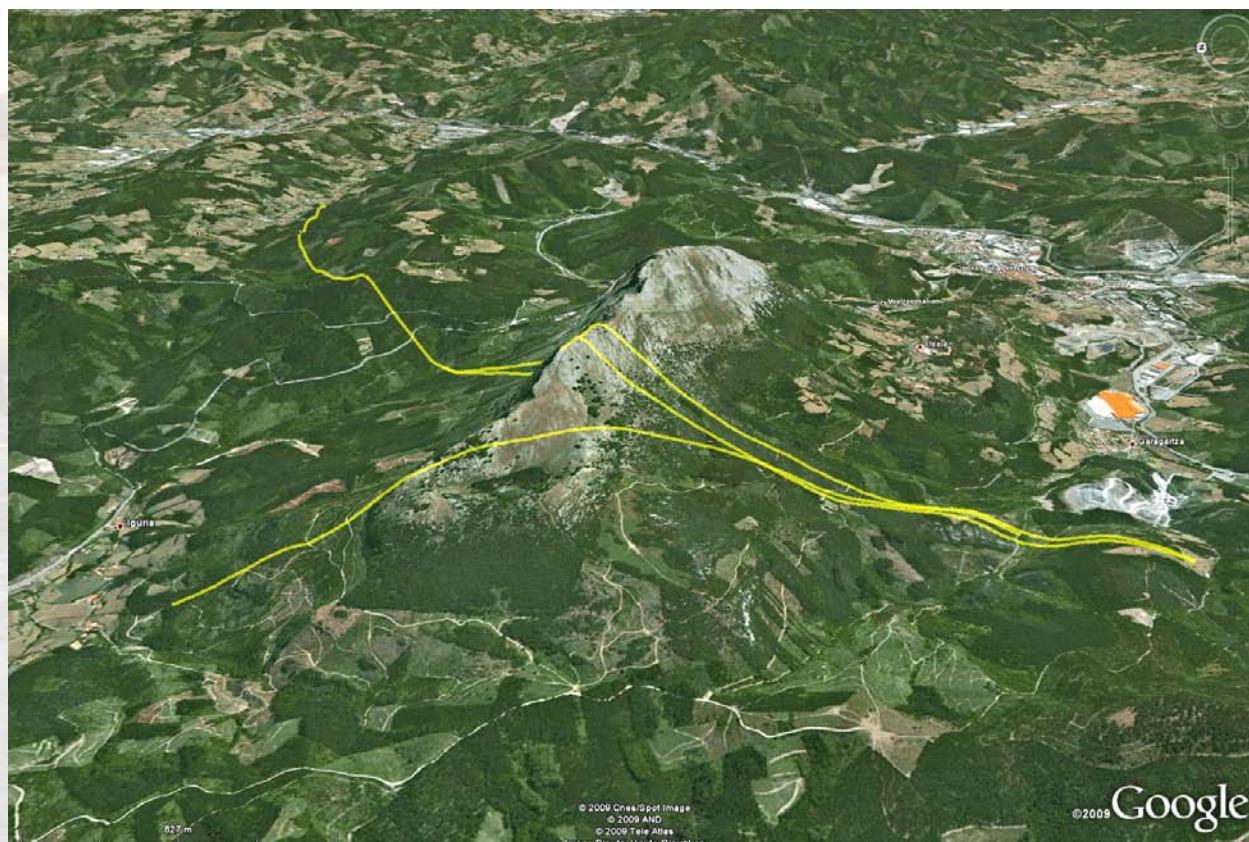
EUSKADIKO PORTU, UBIDE ETA  
BIDEETAKO INGENIARIEN KOLEGIOA  
COLEGIO DE INGENIEROS DE CAMINOS,  
CANALES Y PUERTOS DEL PAÍS VASCO



Euskadiko Geologoen  
Elkargo Ofiziala  
Ilustre Colegio Oficial de  
Geólogos del País Vasco



## Ubicación de las obras.



## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Características de las obras.

Túnel	Tipología	Sección (m <sup>2</sup> )	Longitud (Km)	Cotas emboquilles (m.s.n.m.)		Pendiente (‰)
				Sur	Norte	
Mondragón-Elorrio	Monotubo	85	3,1	375	324	18
Mondragón-Bergara	Bitubo	2 x 57	2 x 6,8	362	254	18 - 12

(\*) Datos procedentes del proyecto básico.

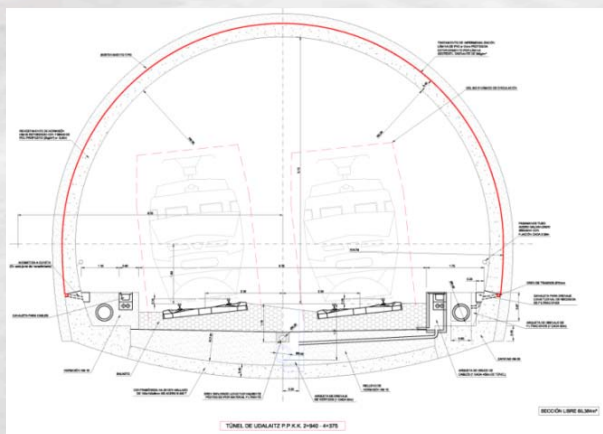
Mondragón-Bergara (*)	Bitubo	2 x 52	2 x 6,9	363	250	5 - 18
-----------------------	--------	--------	---------	-----	-----	--------

(\*) Datos provisionales procedentes del proyecto constructivo actualmente en ejecución.

Solo unos 1.500 m de cada tubo atraviesan el macizo de Udalaitz.

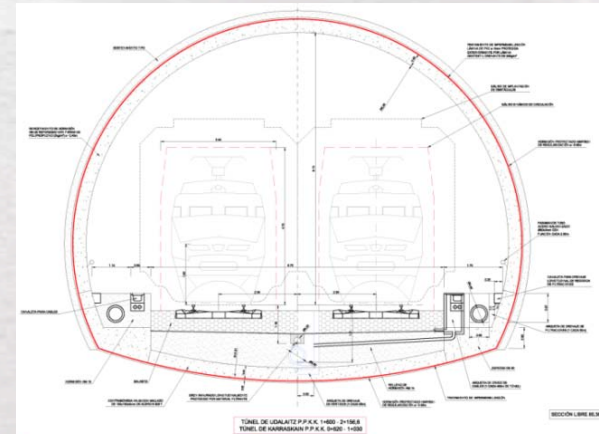
Sección convencional.

Sección no estanca. Prevista en la zona no saturada del acuífero.



Sección especial.

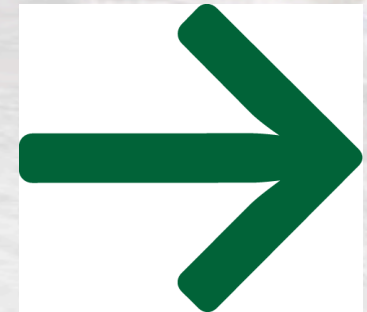
Sección estanca. Prevista en la zona saturada del acuífero.





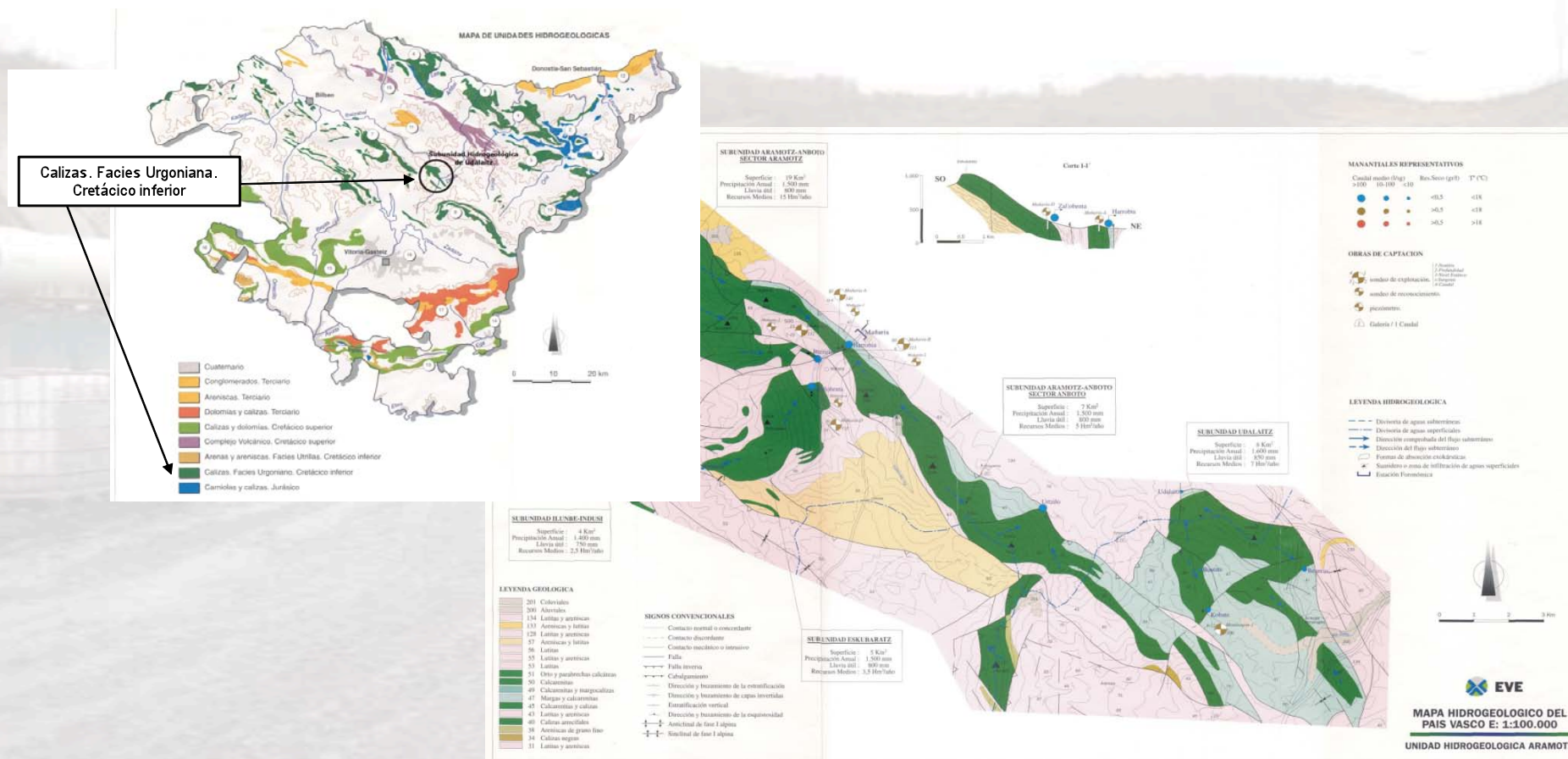
# Los túneles de Udalaiz y su interacción con el medio hidrogeológico

## 2. Marco Geológico e Hidrogeológico. Planteamiento del problema.



## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

# Mapa Hidrogeológico del País Vasco.



## Subunidades de la Unidad Hidrogelológica de Aramotz.



## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Características generales de la Subunidad Hidrogeológica de Udalaitz (elaborado a partir del Mapa Hidrogeológico del País Vasco).

La Subunidad Hidrogeológica de Udalaitz ocupa una extensión de unos 8 km<sup>2</sup> de materiales permeables aflorantes en el extremo más oriental de la Unidad Hidrogeológica de Aramotz. El acuífero está constituido, fundamentalmente, por calizas masivas arrecifales con rudistas y corales (Calizas Organógenas) pertenecientes al Complejo Urgoniano. Estos materiales configuran un pliegue anticlinal cuyo eje se sitúa en la cresta del monte Udalaitz (1.117 m), cabalgante sobre los materiales situados al Norte, de carácter impermeable (lutitas limosas y arenosas), pertenecientes al Complejo Supraurgoniano Basal.

El río Deba atraviesa la subunidad en su extremo oriental, a la cota 200 m.s.n.m., limitando la zona de estudio.

Con una precipitación media anual de 1.600 mm y una infiltración estimada del 47% (equivalente a 750 mm), para una extensión de unos 8 km<sup>2</sup> genera unos recursos anuales de 6 hm<sup>3</sup>.

A esta cantidad habría que añadir la recarga al acuífero procedente de la escorrentía superficial de materiales de baja permeabilidad, que fue estimada en 1 hm<sup>3</sup>/año, lo que da un total de 7 hm<sup>3</sup>/año, drenados de la siguiente forma:

- 3 hm<sup>3</sup>/a por la zona de Beneras
- 2,5 hm<sup>3</sup>/a por la zona de Kobate
- 1,5 hm<sup>3</sup>/a directo al río Deba





## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

# Declaración de Impacto Ambiental.

“3. Medidas de protección del sistema hidrológico y de la calidad de las aguas:

- e) En la redacción del proyecto definitivo deberá realizarse un **estudio hidrogeológico detallado**, en el espacio número 25 **Udalaitz**, sobre el funcionamiento del aprovechado sistema kárstico de aguas subterráneas, al objeto de **evitar la entrada de sólidos (tierras) y otros contaminantes arrastrados por la escorrentía** sobre las superficies alteradas, así como para **conocer mejor el acuífero y su funcionamiento y reponer caudales una vez finalizadas las obras.**”

Condición D.I.A.: estudio hidrogeológico detallado con tres objetivos.

- *Estudio Hidrogeológico* incluido en el Proyecto de construcción.

1ª fase. Aplicación directa de la D.I.A.

Gestión de 2 actuaciones:

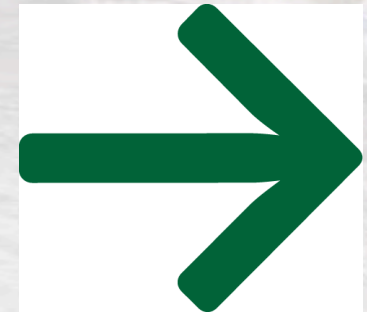
- *Estudio de Seguimiento y Control Hidrogeológico.*

2ª fase. Desarrolla los objetivos 2 y 3 de la D.I.A.

El objetivo 1 de la D.I.A. (no contaminación del acuífero por las obras), afecta directamente a la ejecución de las obras y queda englobado en el *Programa de Vigilancia Ambiental* de la Obra.

# Los túneles de Udalaitz y su interacción con el medio hidrogeológico

## 3. Descripción de los trabajos realizados.



## El Proyecto de Construcción.

- ▶ Estudio Hidrogeológico (Anejo de integración ambiental):
  - ▶ Recopilación de información existente.
  - ▶ Inventario de puntos de agua.
  - ▶ Campaña hidroquímica.
  - ▶ Análisis de la información.
  - ▶ Recomendaciones para el Proyecto.



## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Estudio de Seguimiento y Control Hidrogeológico.

- ▶ Campañas complementarias: sondeo SH-1 (500 m), cartografía geológica, prospección geofísica...
- ▶ Análisis de la información disponible, conclusiones y recomendaciones.
- ▶ Red de seguimiento:
  - ▶ Red estaciones pluviométricas.
  - ▶ Red forométrica en manantiales.
  - ▶ Red piezométrica.
- ▶ Asesoramiento hidrogeológico (obras, proyectos...)

## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Red pluviométrica.

Apoyada en la red pública de estaciones del Gobierno Vasco.





## Red piezométrica.

Piezómetros:

- Manuales: lectura bimensual/mensual.
- Automáticos: lectura horaria.





## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Red forométrica.

Totalmente automatizada.



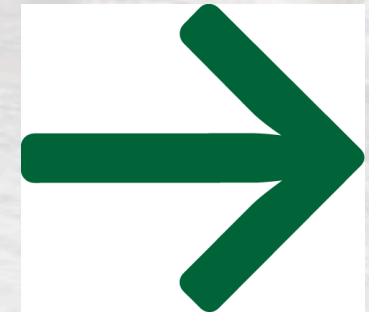


## Red forométrica.



# Los túneles de Udalaiz y su interacción con el medio hidrogeológico

## 4. Funcionamiento hidrogeológico.





## Vista general del macizo kárstico.





## Detalles del modelado kárstico.





## Detalles del modelado kárstico.





## Detalles del modelado kárstico.





# Los túneles de Udalaitz y su interacción con el medio hidrogeológico

Jefe de Gabinete de Geología y Geotecnia

ADIF

## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO



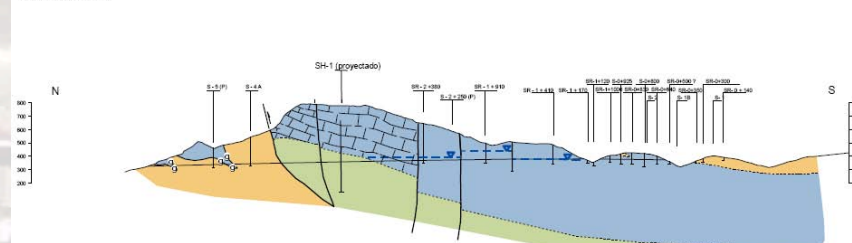
## Mapa hidrogeológico.

La cartografía hidrogeológica de detalle fue la primera tarea del Estudio de Seguimiento y Control.

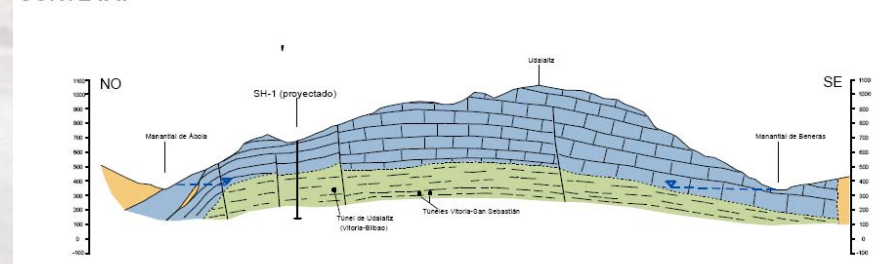


## Cortes hidrogeológicos.

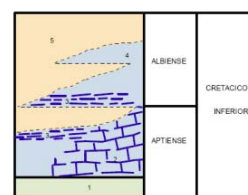
CORTE I-I'



CORTE II-II'

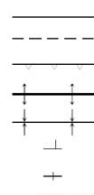


### LITOLOGIA



- 5 - Lutitas esquistosas, margas, areniscas.
- 3 - Margolitas, calizas laminadas.
- 2 y 4 - Calizas masivas, orgánicas, Facies Urginiana.
- 1 - Lutitas y areniscas.

### ESTRUCTURA



### GEOMORFOLOGIA KÁRSTICA

- Donas.
- Sumideros.

### INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

#### NATURALEZA

- Sondeo
- Manantial
- 34-34 N° inventario

#### USO

- Sin uso
- Abastecimiento a población
- Doméstico
- Industrial

- Nivel freático
- Pluviómetro
- 375 Cota de la rasante

Patrocinado por



EUSKADIKO PORTU, UBIDE ETA  
BIDEETAKO INGENIARIEN KOLEGIOA  
COLEGIO DE INGENIEROS DE CAMINOS,  
CANALES Y PUERTOS DEL PAÍS VASCO



Euskadiko Geologoen  
Elkargo Orlaia  
Ilustre Colegio Oficial de  
Geólogos del País Vasco

## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

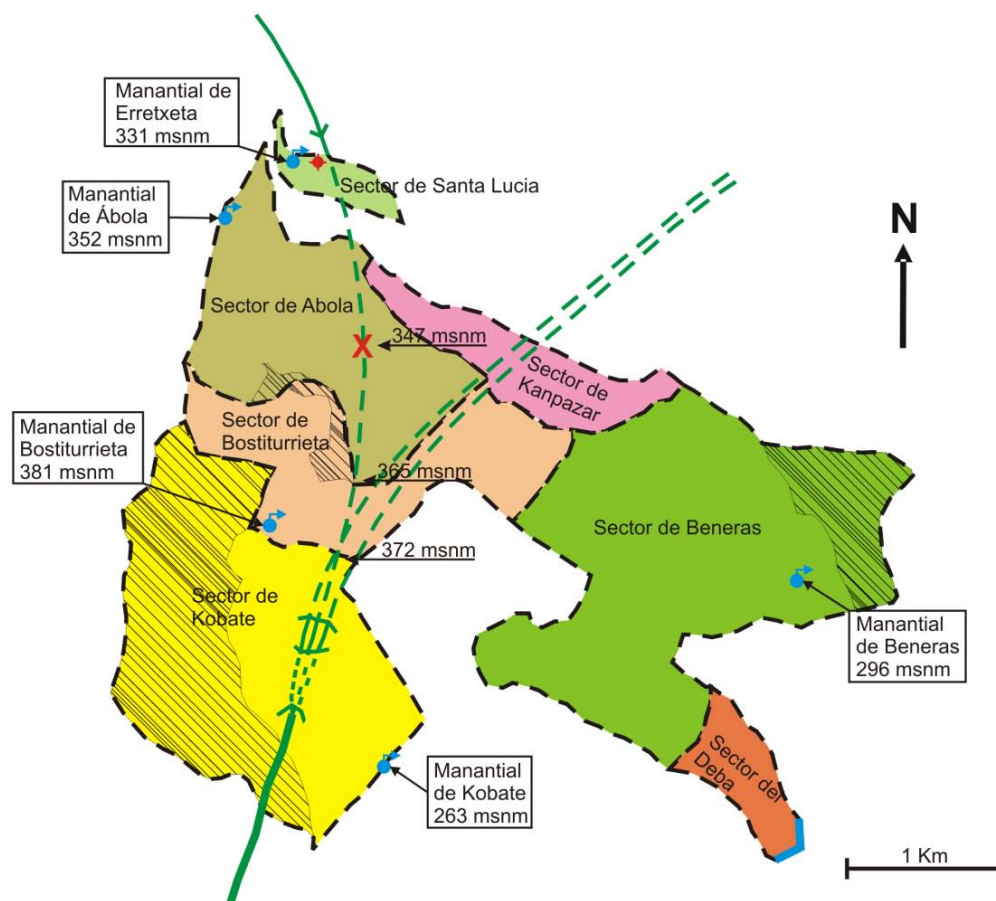
### Sectores hidrogeológicos.

División del acuífero en sectores antes del inicio de las obras.

Técnica usual en Hidrogeología Kárstica:

- Primero: identificar las salidas.
- Segundo: asignar las áreas del acuífero que desaguan hacia esas salidas.

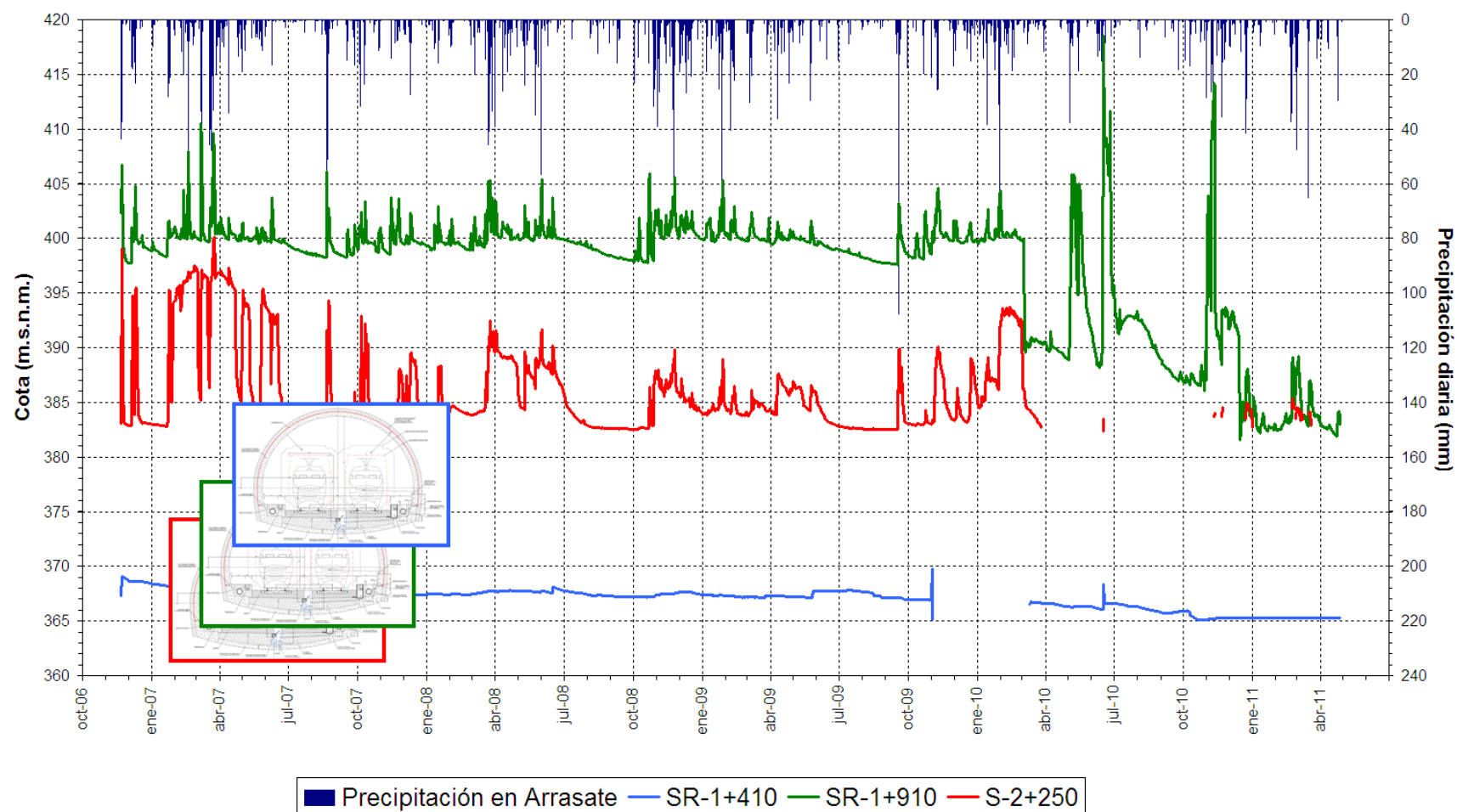
SECTOR	SUPERFICIE (Km <sup>2</sup> )		
	Karst	Impermeable vertiente	Total
Abola	1,66	0,04	1,70
Bostiturrieta	1,27	0,10	1,37
Beneras	2,95	0,48	3,43
Kobate	1,31	2,26	3,57
Santa Lucia	0,19		0,19
Kanpazar	0,63		0,63
Deba	0,38		0,38
<b>TOTAL</b>	<b>8,39</b>	<b>2,88</b>	<b>11,27</b>





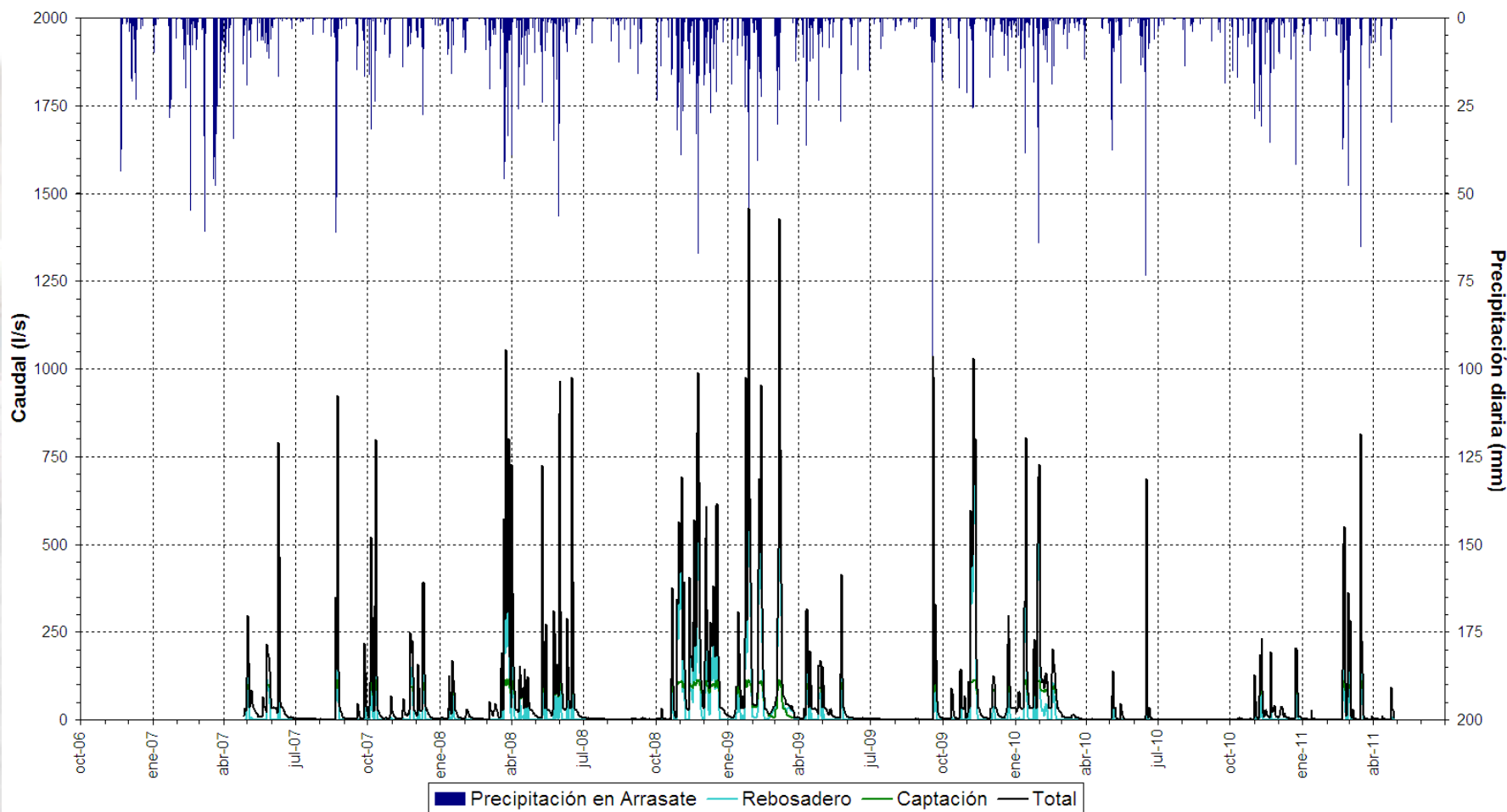
## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Seguimiento piezométrico.



## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Seguimiento forométrico. Manantial de Bostiturrieta.





# Los túneles de Udalaiz y su interacción con el medio hidrogeológico

## 5. Interacción túnel-medio hidrogeológico.

### 5.1. Conocimiento preconstrutivo.



## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### ► Proyecto de Construcción:

El túnel se diseñó con la siguiente información:

- Base del acuífero: falla inversa sobre las lutitas supraurgonianas.
- Afección importante a los manantiales de Bostiturrieta y Abola.
- Sección constructiva estanca: recuperación de régimen de funcionamiento anterior.
  - Subpresión de diseño 40 m.c.a. (máxima observada 30 m.c.a.)



## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

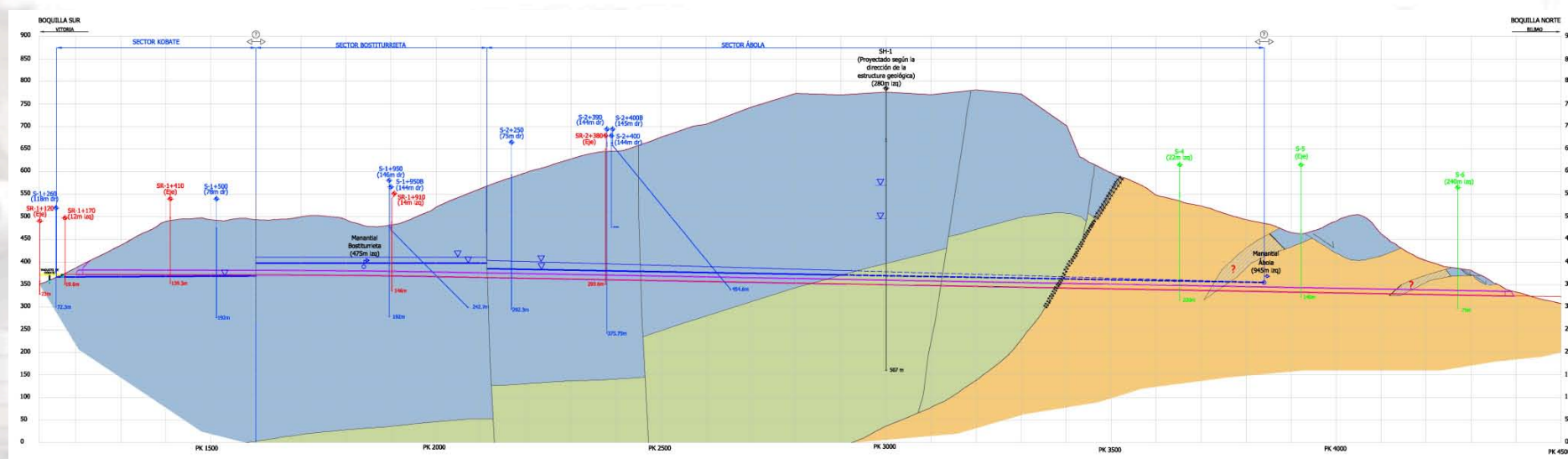
### ► Seguimiento y Control Hidrogeológico:

Nueva información generada:

- Base del acuífero: contacto normal con argilitas infraurgonianas (SH-1).
- Predicción de caudales captados al túnel: drenaje y vertido.
- Subpresión observada: durante cortos periodos se alcanzan los 44 m.c.a. de subpresión en el Sector de Bostiturrieta y 37 m.c.a. en el Sector de Abola. Modificar la sección dos alternativas:
  - Aumentar la resistencia del revestimiento (subpresión de diseño)
  - Diseño de un sistema de alivio parcial de subpresiones.

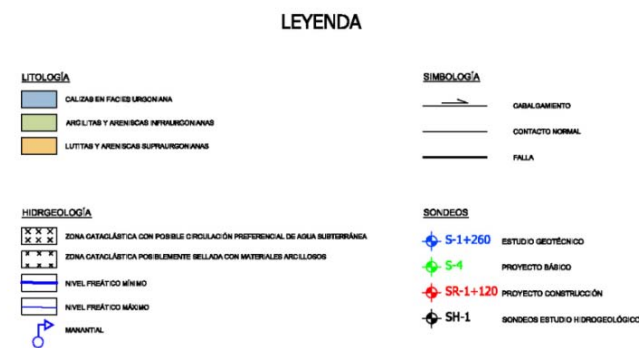
## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Perfil longitudinal. Base del acuífero (SH-1).



### Sondeo SH-1 y campaña de prospección geofísica.

- Modificación del borde norte del acuífero: se interpreta como una falla de gran ángulo, no un cabalgamiento de bajo ángulo.
- El material atravesado por el túnel en la base del acuífero son las argilitas infraurgonianas, no las lutitas supraurgonianas.



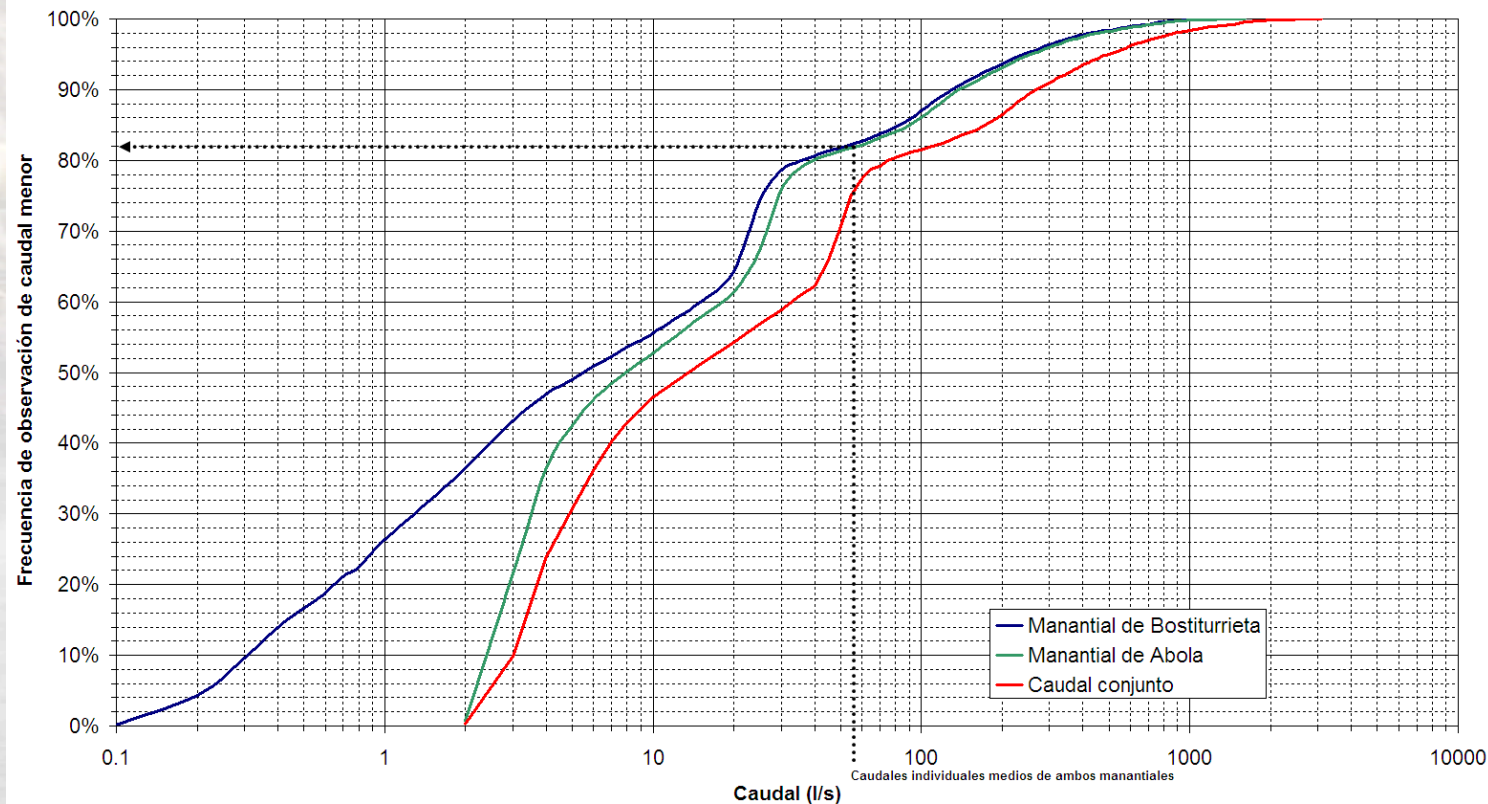


## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

# Predicción de caudales captados por el túnel.

Los sectores de Bostiturrieta y Abola serán afectados por la construcción del túnel Mondragón-Elorrio.

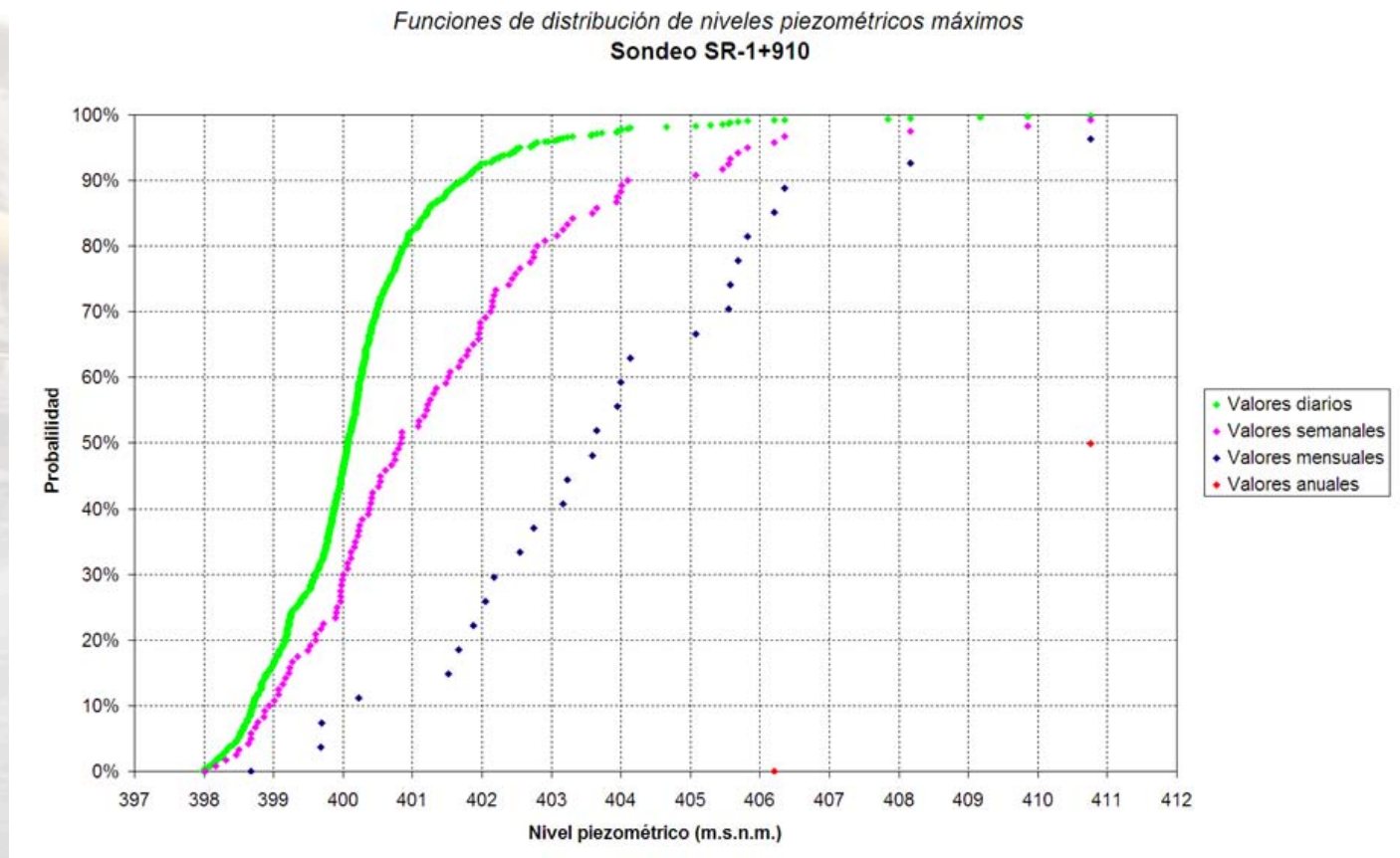
**Caudal de los manantiales de Bostiturrieta y Abola**  
*Curva de frecuencia acumulada*



## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Régimen piezométrico extremal.

Dimensionamiento estructural del revestimiento estanco: subpresión o nivel piezométrico de diseño.  
Régimen piezométrico extremal: faltan datos, escasa serie temporal.

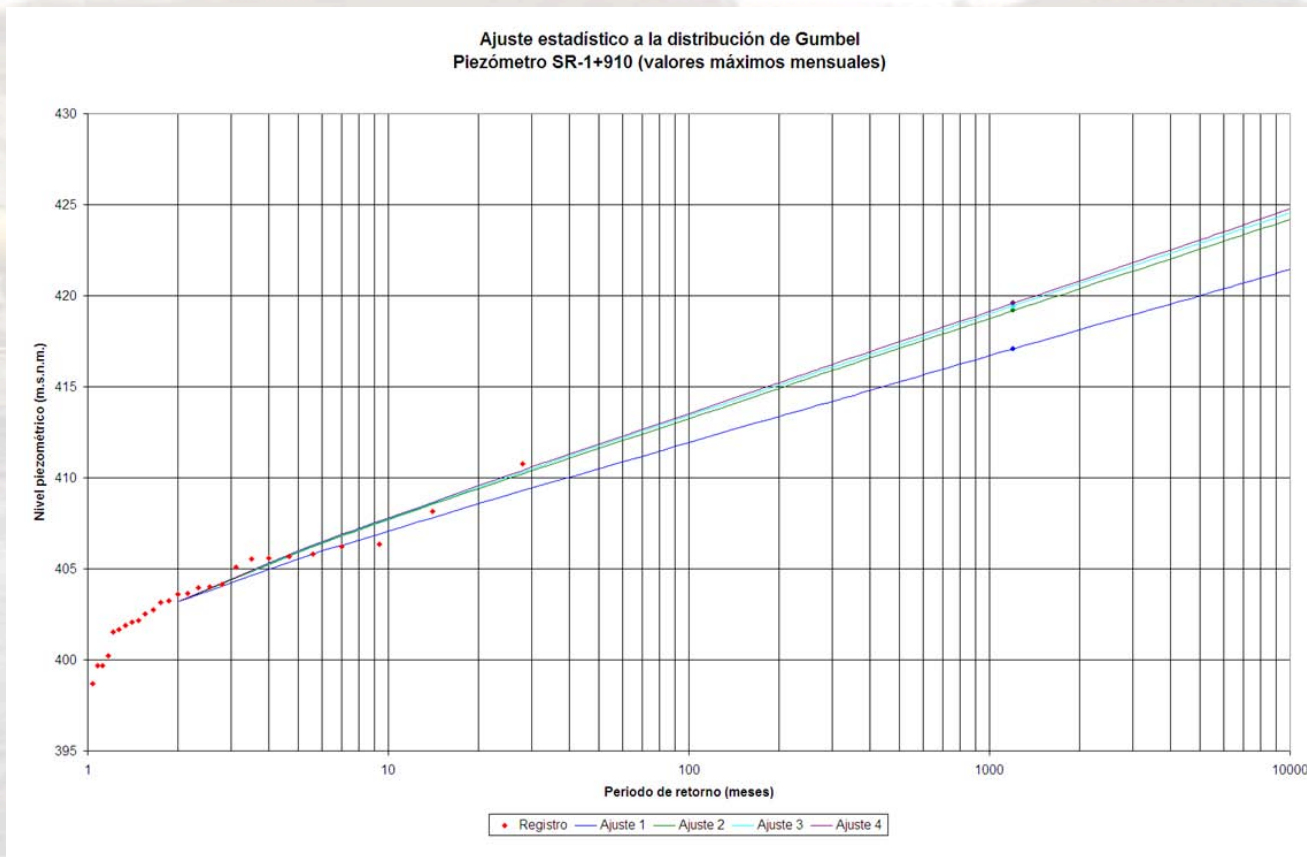




## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Régimen piezométrico extremal. Población escasa: Incertidumbre.

Estudio del régimen extremal. Artificio: en lugar de utilizar años, utilizar meses: 100 años = 1.200 meses

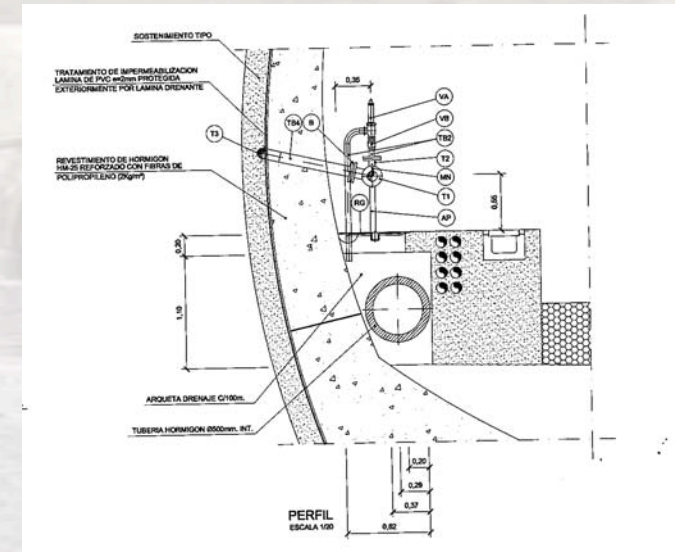
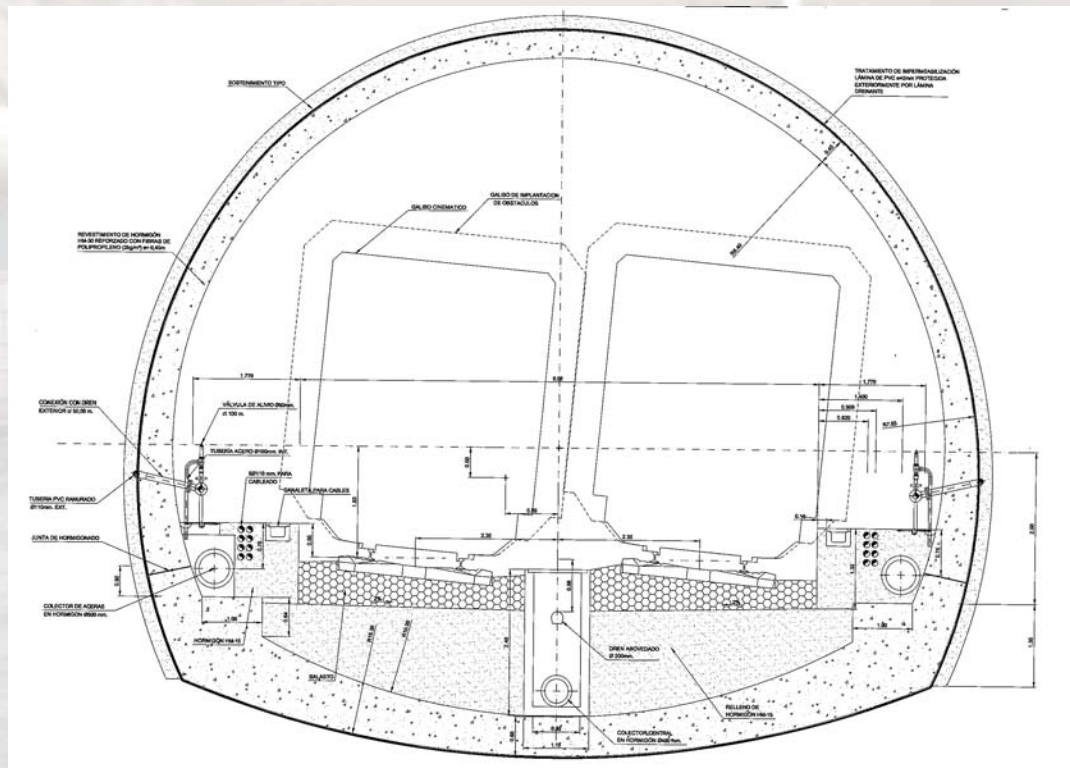


## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Régimen piezométrico extremal. Sistema de alivio parcial de subpresiones.

Solución final:

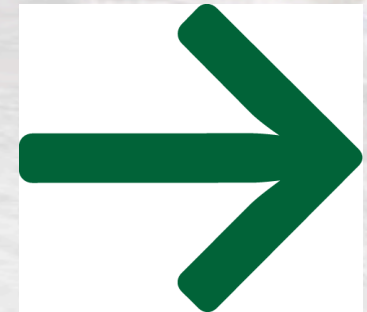
- Régimen normal del acuífero: túnel estanco-salida por manantiales.
- Régimen extremal: sistema de alivio de presiones en el entorno del túnel.





# Los túneles de Udalaiz y su interacción con el medio hidrogeológico

## 5.2. Excavación desde la boca sur del túnel Mondragón-Elorrio



## Boquilla Sur.

Vista panorámica del emboquille sur del túnel Mondragón-Elorrio desde la boca norte del túnel de Karraskain.





## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Cuevas en la zona no saturada del sector de Kobate.

El sector de Kobate se atravesó por encima del nivel freático, apareciendo cavidades limpias por las que circulaba agua en tránsito desde la superficie del terreno hacia la zona saturada del karst.





## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Aguas “naranjas”: destaponamiento y lavado de conductos.

La entrada en la zona saturada del sector de Bostiturrieta se caracterizó por la aparición de conductos y fracturas rellenas de arcillas de decalcificación del macizo carbonatado. El lavado de dichos conductos proporcionaba agua de un característico color naranja.





## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Golpes de agua: destaponamiento y vaciado de sifones (sectores de Bostiturrieta y Abola).

La intercepción de conductos importantes en los sectores de Bostiturrieta y Abola provocó "golpes de agua" de magnitud moderada (algunos miles de m<sup>3</sup>), normalmente precedidos de coladas de barro producto del destaponamiento de los mismos. La morfología de los conductos correspondía habitualmente a sifones, como se aprecia en la foto de la derecha.



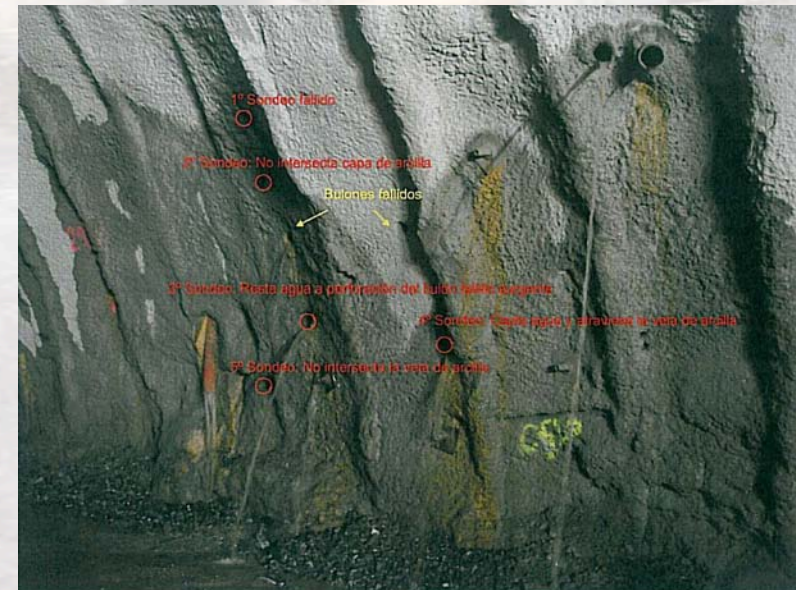


## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Cuevas en la zona saturada del sector de Bostiturrieta.

Además de conductos, en la zona saturada del sector de Bostiturrieta se atravesaron cavidades de dimensiones métricas que, por lo general, se encontraban originalmente rellenas de arcillas de decalcificación. Se atravesaron mediante cerchas y hormigonado y se instalaron drenes en las mismas.

La práctica totalidad de la porosidad del macizo se concentraba en estas cuevas y conductos, pero a pesar de su espectacularidad representaban un porcentaje muy pequeño de la longitud excavada.

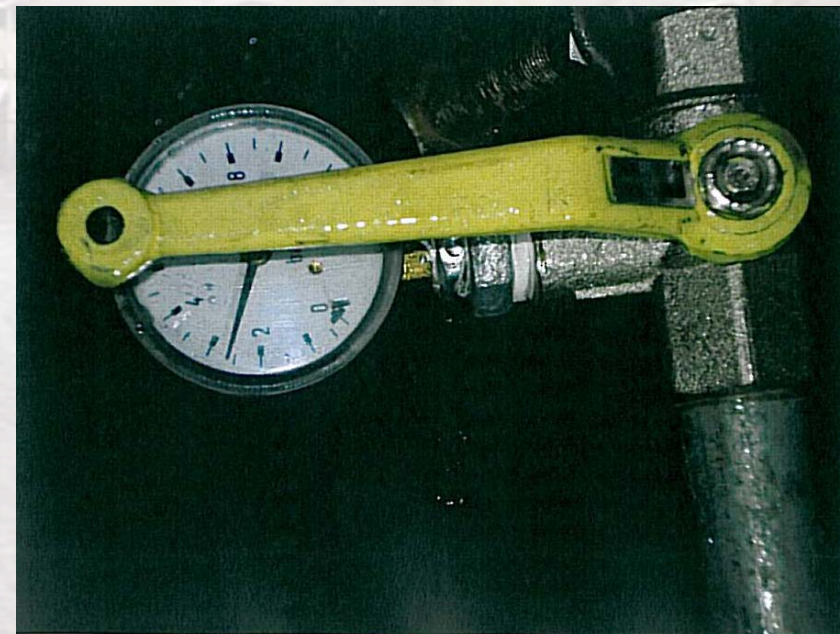




## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Sondeos de reconocimiento en avance: detección de sifones en carga.

Mediante la realización de perforaciones en avance se detectaron algunos sifones en carga, midiéndose en uno de ellos una carga de agua de 2,6 bar (26 m.c.a.). En este caso, el golpe de agua durante la excavación del avance no fue el más importante.



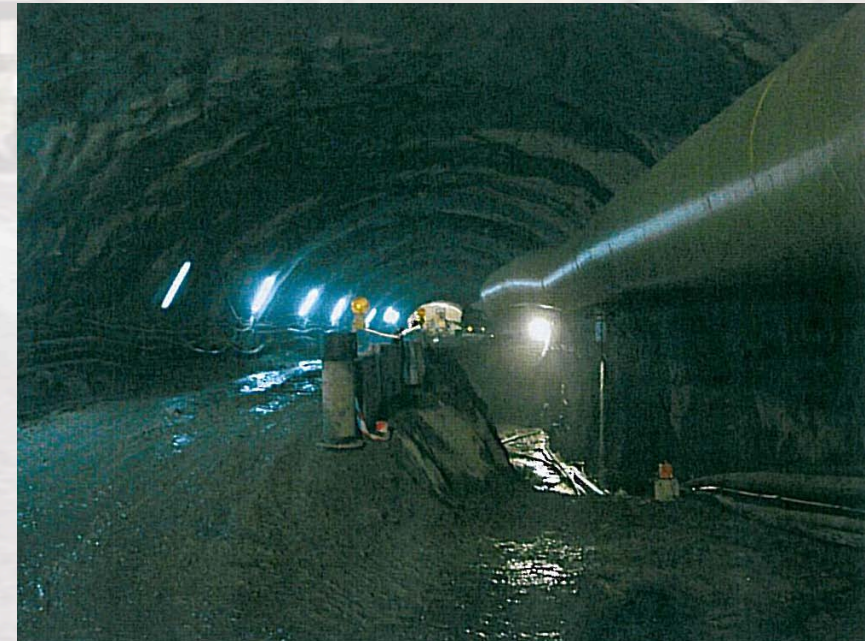


## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Inundación del túnel: entradas de agua localizadas.

La principal entrada de agua al túnel se produjo a consecuencia de la infiltración de precipitaciones de cierta magnitud y persistencia, al haber interceptado el túnel importantes conductos de alimentación del manantial de Bostiturrieta por debajo de la cota de salida de la surgencia.

Para tratar de adecuar el aporte de agua al túnel a la capacidad de achique disponible en su interior se construyó una balsa de regulación excavando media sección de destroza a lo largo de un tramo de túnel.





## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Inundación del túnel: entradas de agua localizadas.

A pesar de estas medidas, el aporte de agua al túnel a consecuencia de precipitaciones de cierta importancia fue de tal magnitud que se produjeron varias inundaciones del túnel. El volumen de agua que afluyó al túnel durante las mismas se cifró en varias decenas de miles de m<sup>3</sup>.

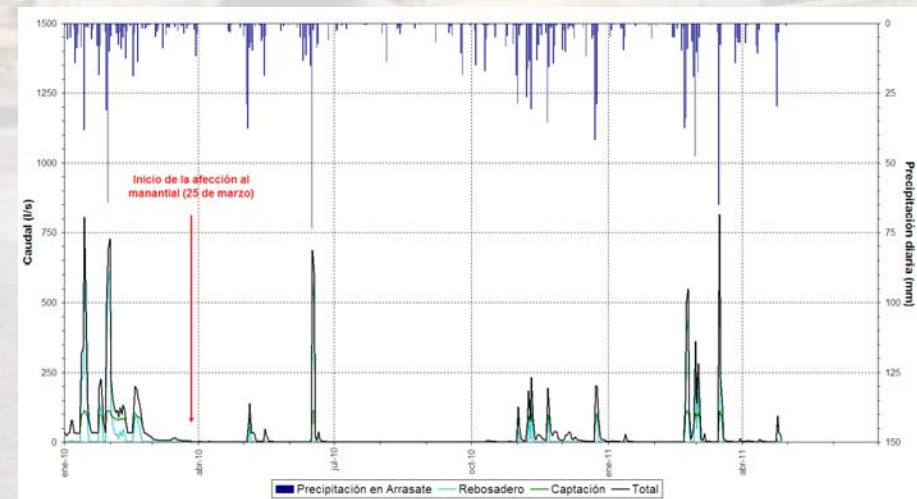
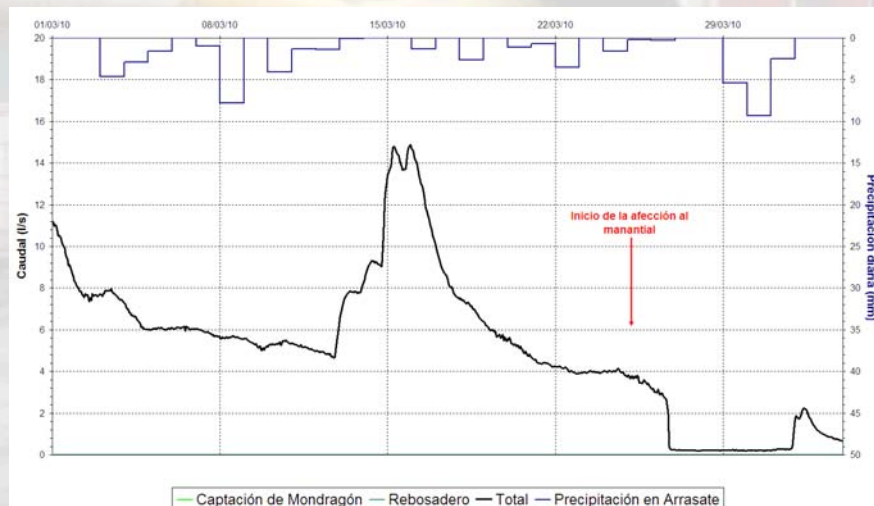


## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Afección al manantial de Bostiturrieta.

La interceptación por el túnel de los conductos de alimentación del manantial de Bostiturrieta produjo una afección al mismo, tal como se había previsto: el manantial prácticamente se secó, inhabilitándose su utilización como abastecimiento parcial del municipio de Arrasate-Mondragón.

El manantial ha vuelto a manar ocasionalmente con motivo de precipitaciones importantes.





## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Manantial de Bostiturrieta: "trop plein" del túnel.

El túnel constituye en este momento el punto de descarga más bajo del sector de Bostiturrieta, por lo que el manantial de Bostiturrieta se ha convertido en un "trop plein" del acuífero: una surgencia intermitente del karst que funciona únicamente en condiciones de acuífero "lleno", cuando la capacidad de circulación en los conductos que alimentan el punto de descarga inferior es insuficiente, descargando una parte de la punta de la crecida (entre una y otra imagen apenas transcurrieron 20 horas).

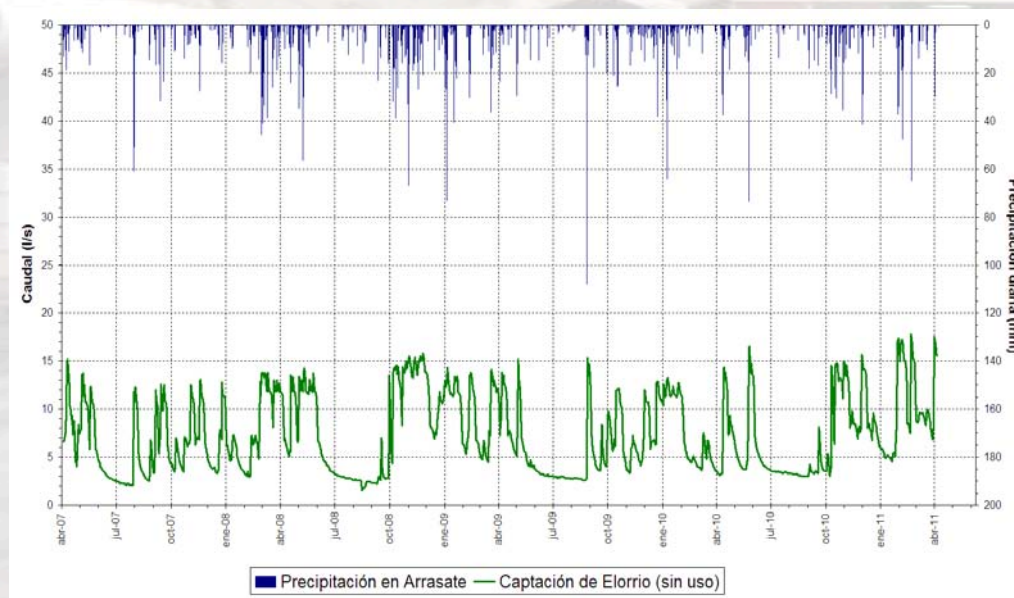




## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Manantial de Abola: sin afección.

Es posible que a través del túnel se haya producido la conexión entre el sector de Bostiturrieta y el de Abola y que, por tanto, exista transferencia de recursos desde el primero hasta el segundo. Esto supondría un aumento del caudal del manantial de Abola como consecuencia del vaciado del agua acumulada en el túnel. Todavía no ha sido posible comprobar la posibilidad de este fenómeno.





## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Manantial de Kobate: vaciado del túnel durante las inundaciones y aparición de "trop pleins".

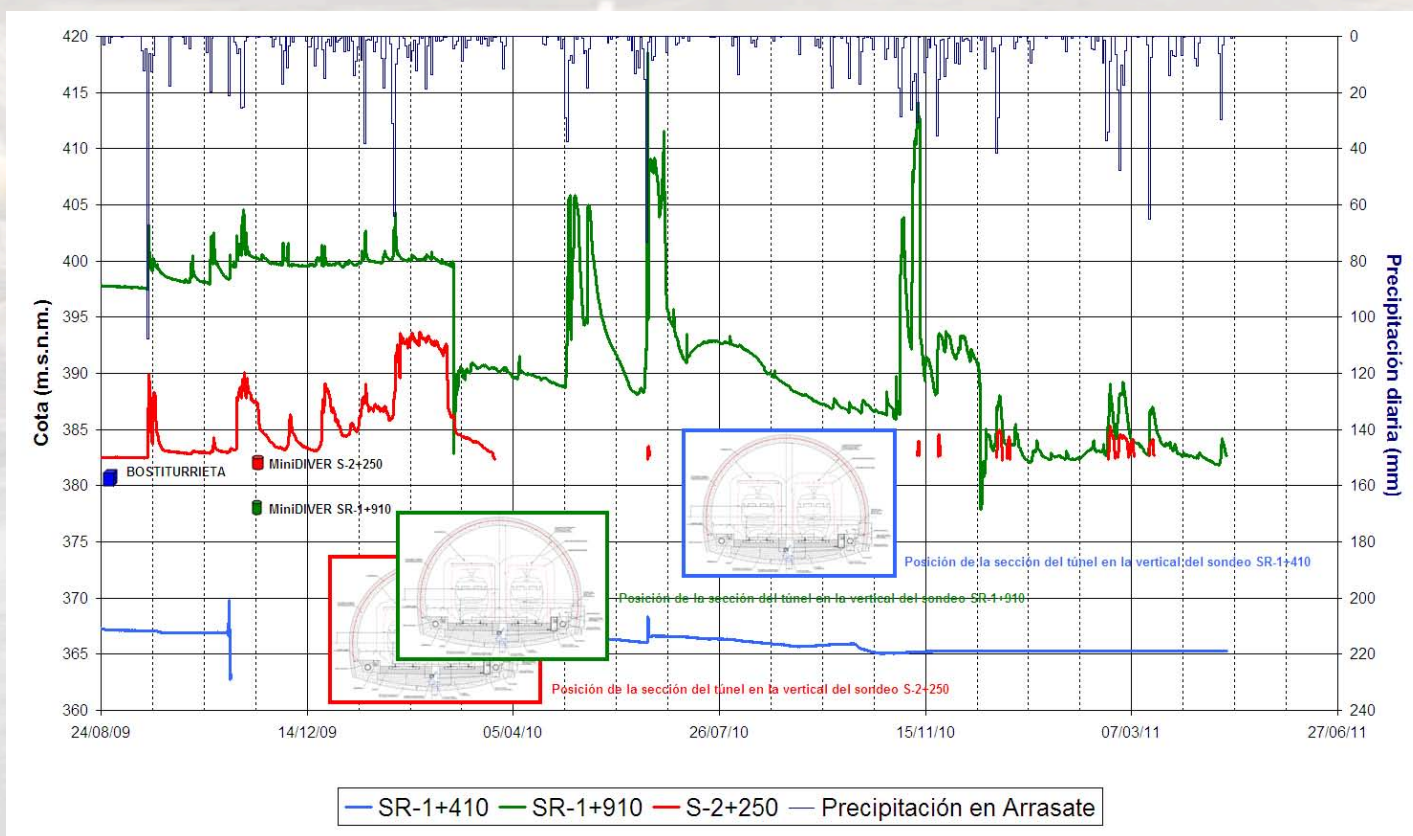
Las inundaciones del túnel de Udalaitz se han vaciado a través del sector de Kobate, situado al inicio del túnel y en el que el nivel de agua se encuentra por debajo de la rasante del túnel. Esto ha supuesto un aumento del caudal de agua circulante en este sector durante los episodios de precipitaciones importantes, provocando la aparición de "trop pleins" en el mismo (a la izquierda, punto de descarga principal del manantial de Kobate; a la derecha, "trop plein" a cota superior).



## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Registro de los piezómetros de la traza.

Durante la excavación del túnel desde la boca sur se vieron afectados los 3 piezómetros automáticos instalados en las inmediaciones de la traza: 2 de ellos con descensos del nivel de base del agua en los mismos, y el tercero, correspondiente al sector de Kobate, con aumento puntual del nivel del agua durante uno de los episodios de inundación del túnel.

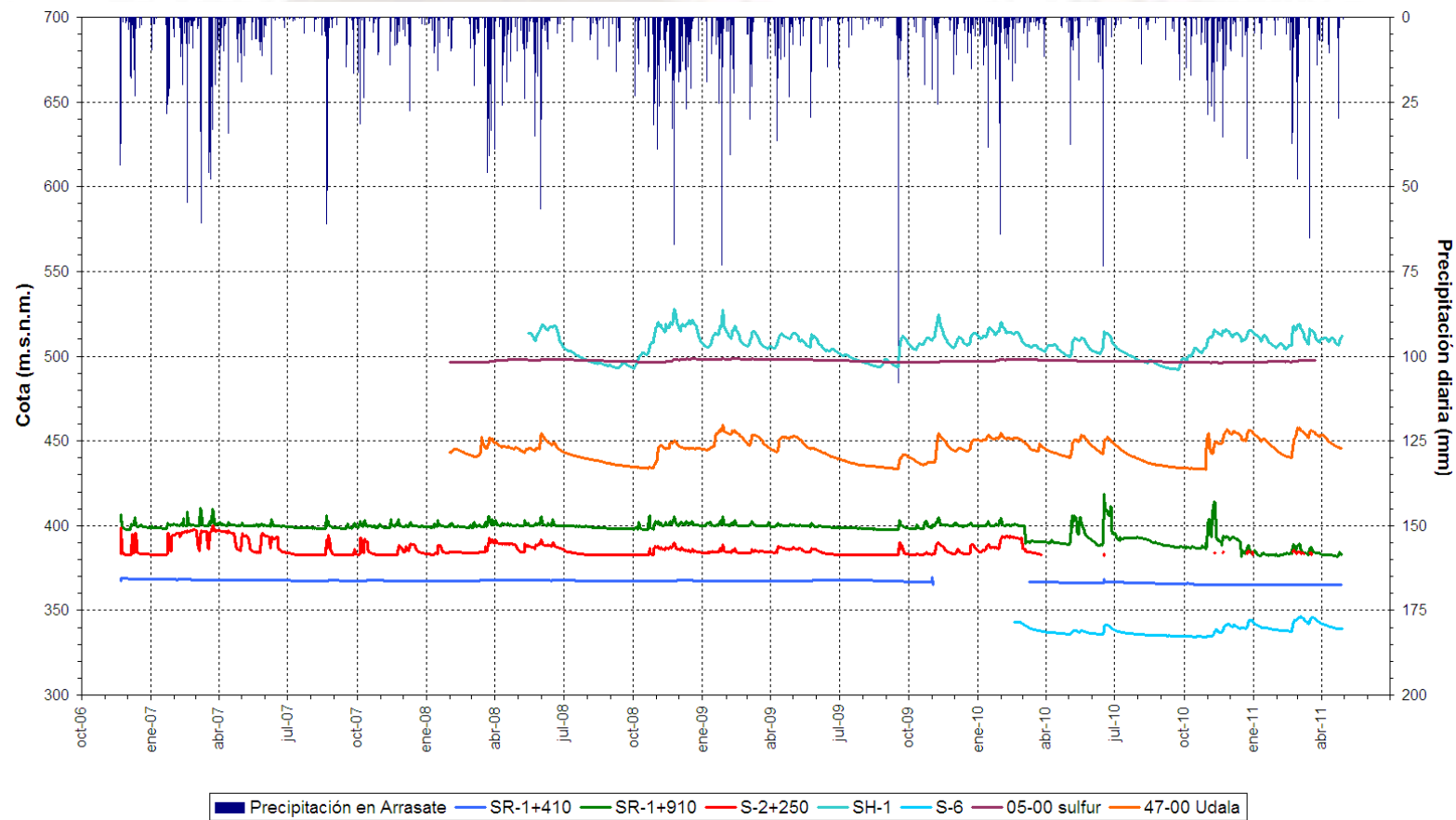




## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

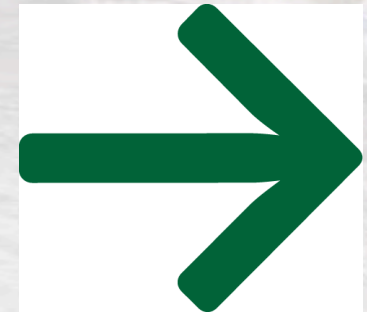
### Registros de la totalidad de los piezómetros.

El resto de piezómetros instrumentados en el macizo hasta ese momento no se han visto afectados por la perforación del túnel Mondragón-Elorrio desde su boca sur.



# Los túneles de Udalaiz y su interacción con el medio hidrogeológico

## 6. Conclusiones





## Utilidad de la investigación hidrogeológica.

- ▶ Obligación de la D.I.A.
- ▶ Información útil previa a la construcción:
  - ▶ Estado inicial del medio hidrogeológico a restituir.
  - ▶ Distribución extremal de niveles piezométricos.
  - ▶ Caudales captados por los túneles.
- ▶ Información útil durante la construcción:
  - ▶ Constatación de afecciones.
  - ▶ Reservas movilizadas (estimar la recuperación de niveles).
  - ▶ Comprobación del comportamiento pronosticado.
- ▶ Información útil después de la construcción:
  - ▶ Control de recuperación de afecciones.

## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Particularidades de los estudios hidrogeológicos.

- ▶ Extensión de la zona afectada (todo el acuífero) que requiere un modelo geológico a escala adecuada.
- ▶ Necesidad de Red de Control piezométrica y forométrica. No suele bastar con las redes públicas.
- ▶ Extensión temporal del estudio (condicionada por los ciclos hidrogeológicos anuales):
  - ▶ Antes de las obras (estado o blanco inicial).
  - ▶ Evolución de la afección durante las obras (información irrepetible).
  - ▶ Después de las obras (seguimiento de recuperación del impacto).



## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Experiencia adquirida durante la construcción.

- ▶ Distinto comportamiento de la zona saturada y no saturada del macizo.
- ▶ Mayor desarrollo de la karstificación por encima de la cota de los manantiales.
- ▶ Conductos kársticos menos desarrollados bajo la cota de descarga de los sectores, que se encuentran taponados por arcillas de decalcificación y arrastres procedentes de la superficie.
- ▶ Las surgencias kársticas constituyen el afloramiento de una red jerarquizada y fractal de conductos kársticos.
- ▶ Desde el punto de vista hidráulico, la red kárstica esta constituida por una serie de sifones interconectados.
- ▶ Cada sifón constituye un punto de descarga interno de una zona del karst.

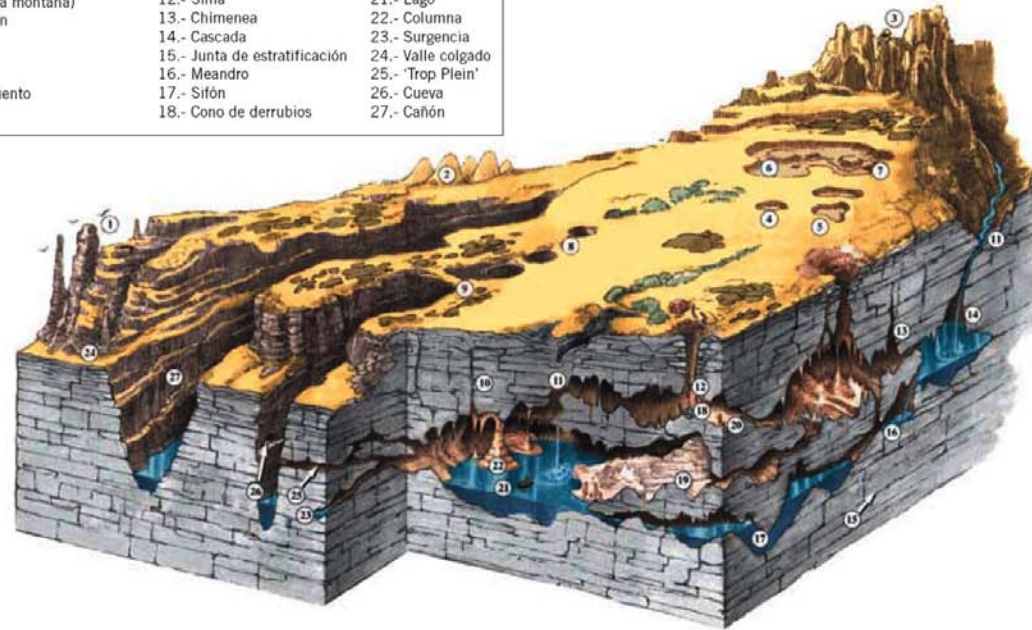
## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Experiencia adquirida durante la construcción.

La figura ilustra la existencia de niveles de agua colgados en el interior del karst por encima de su nivel de descarga principal, tal como se ha observado durante la excavación del túnel Mondragón-Elorrio, así como la disminución de conductos por debajo del nivel de descarga principal. Sin embargo, el grado de karstificación de la zona no saturada mostrado en la figura se encuentra exagerado a efectos ilustrativos.

FORMAS MÁS CARACTERÍSTICAS DE UN PAISAJE KÁRSTICO  
(Tomada de J.L. Saura para J. Martínez en Ediciones Desnivel)

- |   |                               |                    |
|---|-------------------------------|--------------------|
| 1.- Tepuys (karst en cuarcitas)               | 10.-Diaclasa                  | 19.- Gours         |
| 2.- Pitones, torres, mogotes (karst tropical) | 11.- Sumidero                 | 20.- Galería fósil |
| 3.- Lapiaz (karst de alta montaña)            | 12.- Sima                     | 21.- Lago          |
| 4.- Dolina de disolución                      | 13.- Chimenea                 | 22.- Columna       |
| 5.- Uvala                                     | 14.- Cascada                  | 23.- Surgencia     |
| 6.- Polje                                     | 15.- Junta de estratificación | 24.- Valle colgado |
| 7.- Ponor                                     | 16.- Meandro                  | 25.- 'Trop Plein'  |
| 8.- Dolinas de hundimiento                    | 17.- Sifón                    | 26.- Cueva         |
| 9.- Puente de roca                            | 18.- Cono de derrubios        | 27.- Cañón         |





## TÚNELES FERROVIARIOS EN EL PAÍS VASCO

### Experiencia adquirida durante la construcción.

- ▶ En estiaje, los sifones activos mantienen niveles de agua colgados independientes, sin constituir un nivel de saturación general y continuo para todo el sector (existencia de niveles de agua no drenados por encima del túnel).
- ▶ En crecida, la incapacidad de la red kárstica para desaguar el volumen de agua infiltrada provoca que los sifones entren en carga, siendo entonces cuando se puede considerar la existencia de un nivel de saturación general para el karst (carga de agua sobre el túnel).
- ▶ El carácter jerarquizado y fractal de la red kárstica provoca que cada sifón tenga un comportamiento similar, a menor escala, que la surgencia principal.
- ▶ La afluencia de agua al túnel ha provenido de:
  - ▶ Destaponamiento y vaciado de la zona saturada del manantial de Bostiturrieta y de sifones secundarios de ese sector y del de Abola.
  - ▶ Descarga de la red kárstica que anteriormente afloraba en el manantial de Bostiturrieta.