

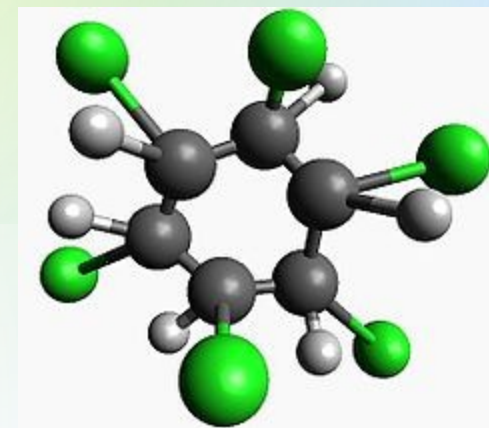
NUEVAS TENDENCIAS EN LA RESTAURACIÓN DE SUELOS
DEGRADADOS III: METALES, CONTAMINANTES ORGÁNICOS Y
HUMEDALES ARTIFICIALES

NEW TRENDS IN RESTORATION OF DEGRADED SOILS III: TRACE ELEMENTS, ORGANIC
POLLUTANTS AND CONSTRUCTED WETLANDS

**“ RESIDUOS DE LINDANO EN ARAGÓN.
LINDANO Y AGUA”.**

“THE LINDANE CASE IN ARAGON. LINDANE AND WATER”

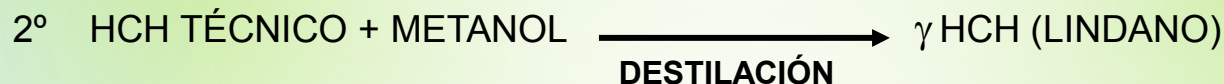
*Fernández, J, Unidad Lindano, Dirección General de Sostenibilidad, Departamento de
Desarrollo Rural Y Sostenibilidad, Gobierno de Aragón*



El origen del problema

El lindano es un organoclorado de fórmula básica $C_6H_6Cl_6$, en concreto el isómero gamma-1,2,3,4,5,6-hexaclorocicloexano, utilizado como insecticida en agricultura y para el tratamiento de piojos y sarna en humanos o de diversos parásitos en ganadería

***INQUINOSA PRODUCE 27 T/día de HCH (Hexaclaro Ciclo Hexano), con 5 isómeros principales de los cuales solo uno, el γ HCH tiene uso insecticida.**



Generación de residuos :

- 6,800 T/año de sólidos: isómeros de HCH (entre el 85 y 90 % del HCH producido)
- 300-500 T/año de líquidos (1,500 T/año por otras fuentes)

Tipo de residuos:

- 🏭 Reacciones fallidas: Líquidos con benceno, clorobenceno, HCH e intermedios.
- 🏭 Residuos sólidos: isómeros de HCH (α , β , δ , ϵ), impurezas.
- 🏭 Colas de destilación (grasillas): residuo pastoso con metanol, HCH, impurezas.
- 🏭 Lodos de depuración, Carbón activo.
- 🏭 Excedentes de producción de lindano.
- 🏭 Reactivos agotados, embalajes, otros.



Encuadre histórico

1975-88: PRODUCCIÓN DE LINDANO

1988-92: IMPORTA LINDANO Y HACE FORMULACIONES

1975-83: INQUINOSA utiliza el vertedero de SARDAS

1984-92: INQUINOSA utiliza el vertedero de BAILÍN

1987: Denuncias ecologistas por vertidos

1988: Se detectan concentraciones elevadas de LINDANO en el RÍO GÁLLEGO.

1988: la DGA prohíbe la fabricación de lindano

1994: DESMANTELAMIENTO Y ABANDONO DE LA FABRICA

GESTIÓN DE RESIDUOS:

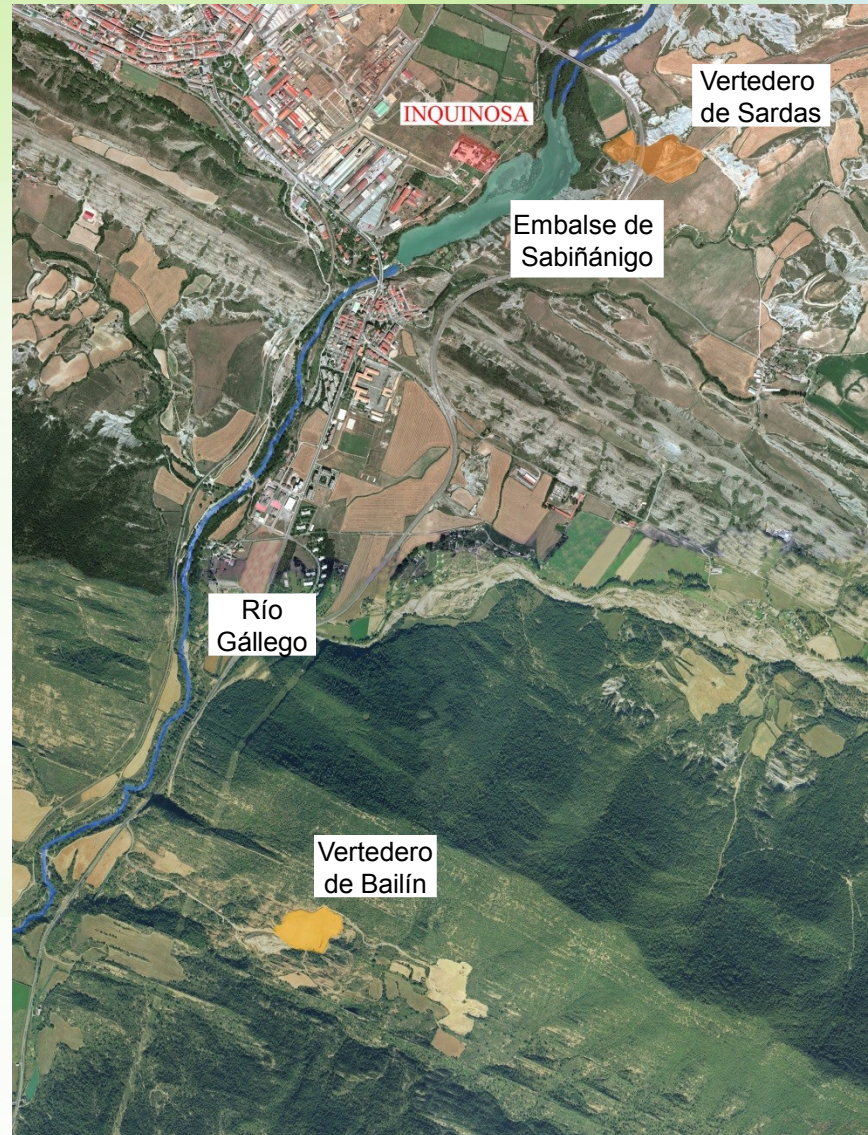
- ☞ Ausencia de regulación
- ☞ Ausencia de conciencia ambiental
- ☞ Actitud empresarial “maliciosa”
- ☞ Vertido directo sobre el suelo
- ☞ Vertido directo de residuos líquidos
- ☞ Emplazamientos geológicos inadecuados

Localización geográfica



RESIDUOS DE LINDANO EN SABIÑANIGO:

- ANTIGUA FACTORÍA DE INQUINOSA
- VERTEDERO DE SARDAS
- VERTEDERO DE BAILÍN
- EMBALSE DE SABIÑANIGO



ACTUACIÓN SUBSIDIARIA DE LA ADMINISTRACIÓN

PRIMERAS ACTUACIONES:

1990-1994. ESTUDIOS DE RIESGO Y REMEDIACIÓN (DGA-MMA).

1996. SELLADO DE VERTEDEROS.

1996-2004. DGA. SEGUIMIENTO TRIMESTRAL de niveles y calidad de aguas, explotación de la planta piloto de tratamiento de lixiviados, obras menores.

2004-ACTUALIDAD: SEGUIMIENTO SISTEMÁTICO:

- Caracterizar el emplazamiento
- Actuaciones de urgencia

- Conocer la hidrogeología
 - Modelo conceptual
 - **Extensión de la pluma**

- **Remover el foco**

- **Descontaminar el acuífero**
 - Ensayos de laboratorio
 - Pruebas piloto
 - Aplicación a escala de campo

- **Control de la contaminación residual**

AVANCE:
NECESIDAD
DISPONIBILIDAD
CONOCIMIENTO

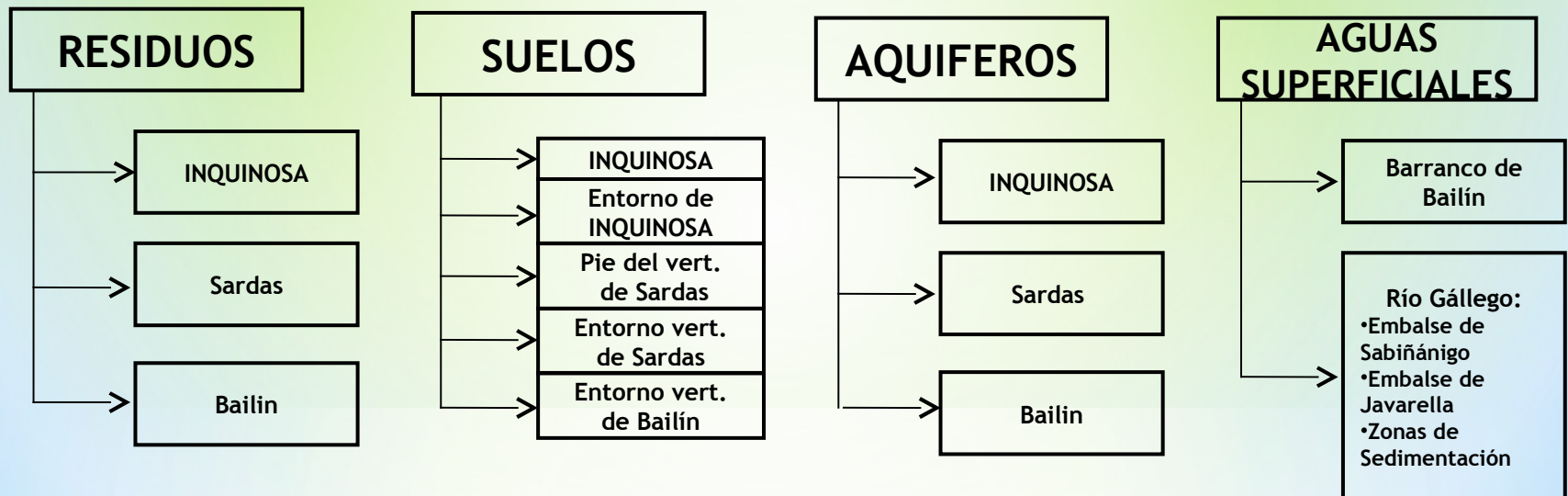
SITUACIONES DE CONTAMINACIÓN

CONTAMINACION MULTICOMPONENTE:

Benceno, policlorobencenos, policlorofenoles, isómeros de HCH, metanol y otros alcoholes, ácidos grasos, dioxinas y furanos, otros ...

Convenio de Estocolmo: α HCH, β HCH, γ HCH, Pentaclorobenceno, dioxinas y furanos.

MATRICES COMPLEJAS:



PRESENCIA DE FASES DENSAS

DATOS BÁSICOS. EI DNAPL (Fase densa no acuosa)

Parameter g/Kg	Max.	Min.
Water	9	2,2
Benzene	11,16	9,4
Chlorobenzenes	305,06	145,09
Phenol	1,72	**
Chlorophenols	4,86	1,21
Tetrachlorociclohexenes	18,64	1,97
Pentachlorociclohexenes	130,69	74,3
Hexachlorohexadieno	65,1	**
Hexachlorociclohexano	167	**
a-HCH	60,92	48,3
b-HCH	1,91	**
g-HCH	148,86	134
d-HCH	129,05	102,2
e-HCH	35,9	21,43
Other HCH isomers	39,97	**
Heptachlorocicloexano	96,38	1,39
Alcohols, others	148,85	136,1
Viscosity 25° Cps	12,1	14,2
Density Kg/l	1,543	1,3662



LA INVESTIGACIÓN SISTEMÁTICA DE LA CONTAMINACIÓN EN SABIÑÁNIGO

TRES ESPACIOS-TRES TIEMPOS



Ruina industrial de INQUINOSA



Ruina industrial de INQUINOSA



Ruina industrial de INQUINOSA



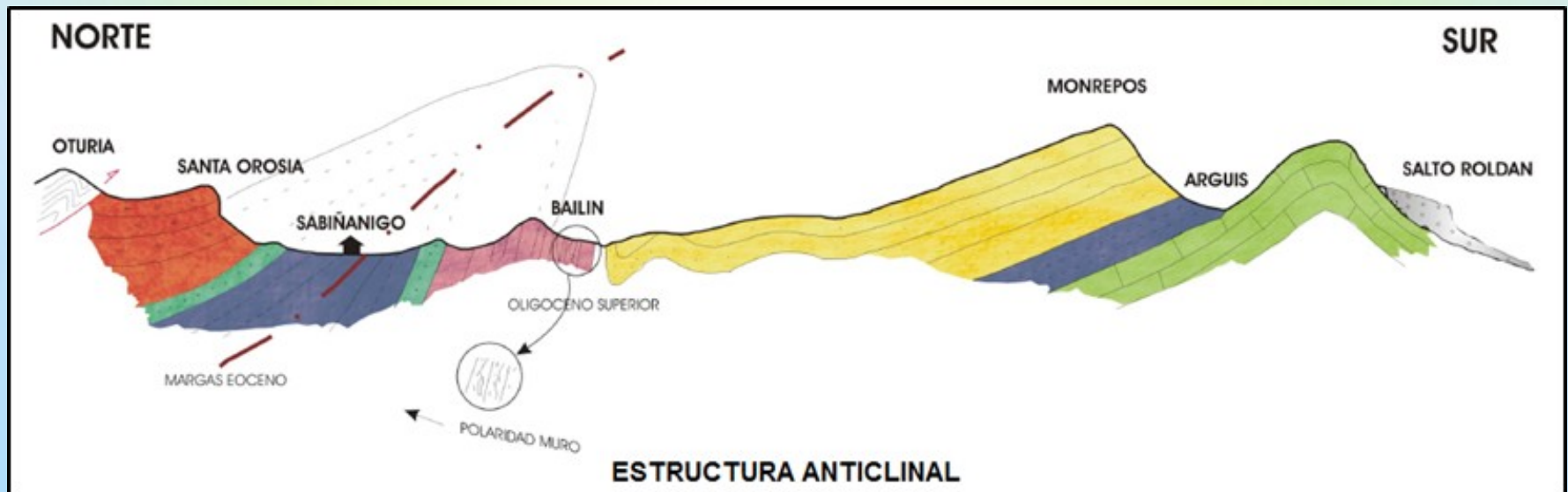
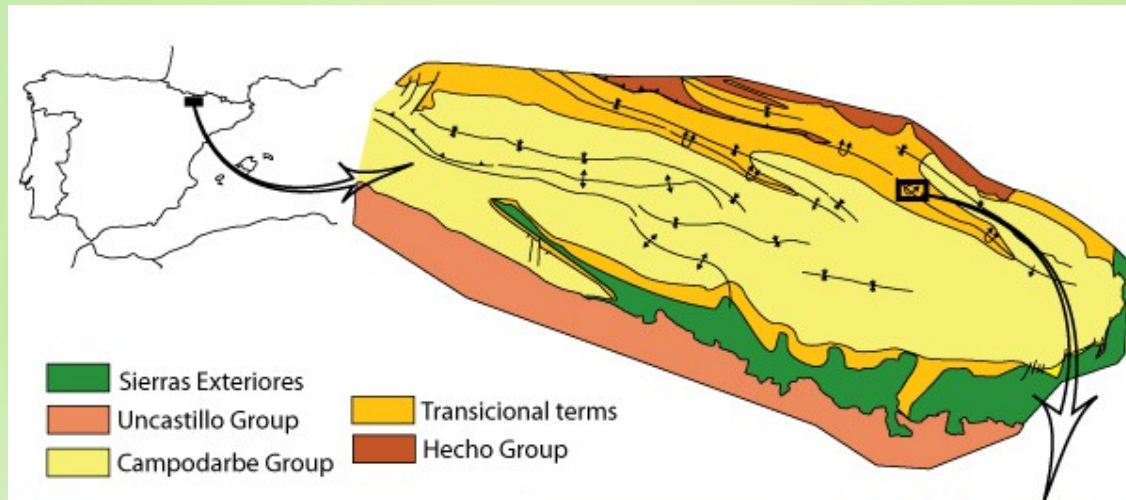
Ruina industrial de INQUINOSA



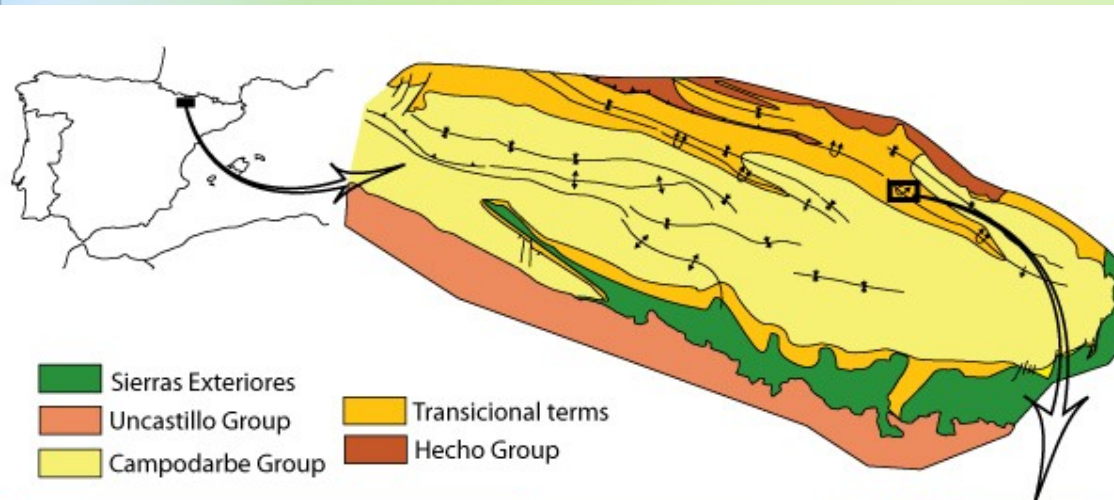
HOY



MARCO GEOLÓGICO GENERAL



MARCO GEOLÓGICO INQUINOSA

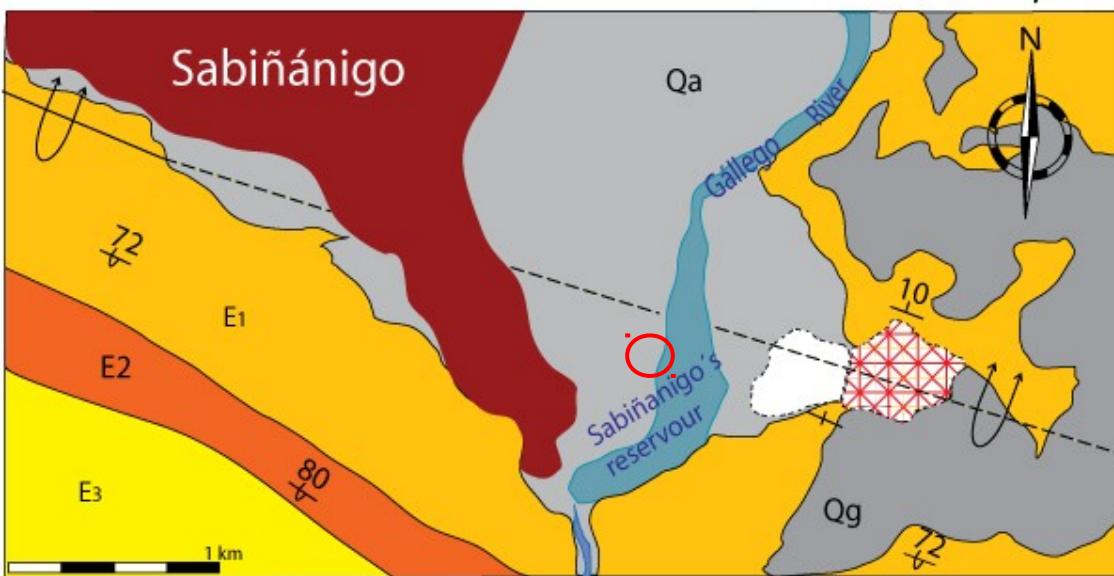





Litología:

Antrópico
 Terraza fluvio-glacial-aluvial
 Sustrato en margas

Estructura:

Cuaternario horizontal
 Margas:
 Pliegue en rodilla
 Buzamiento N suave
 Buzamiento S subvertical



-  (1) Sadas's landfill
-  (2) Aluvial area
-  Urban area
- E1.- Larrés marl
- Qg.- Glacis
- Qa.- Alluvial deposits
- E2.- Sabiñánigo marl
- E3.- Pamplona marl

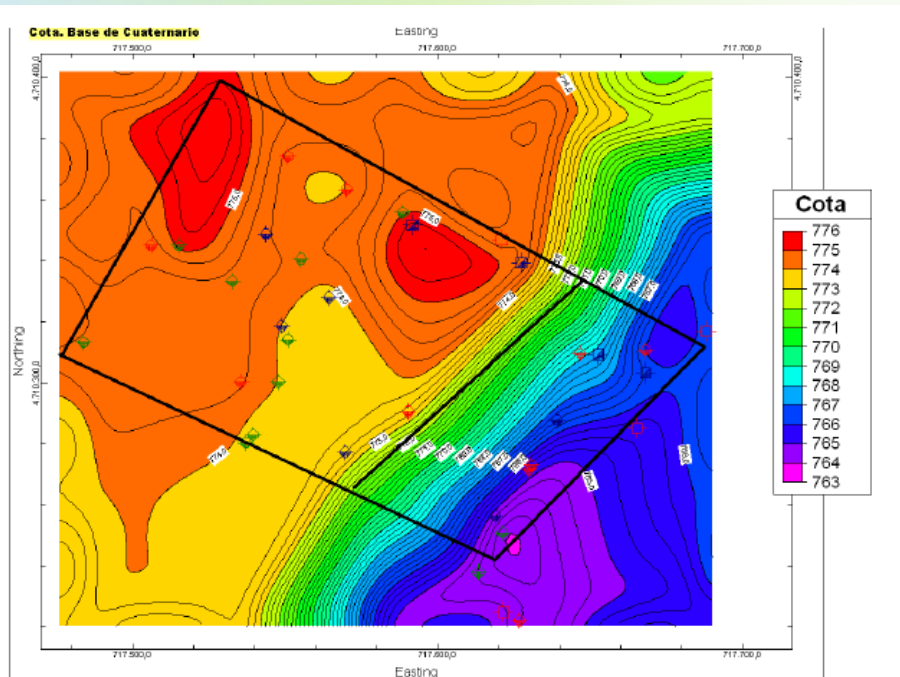
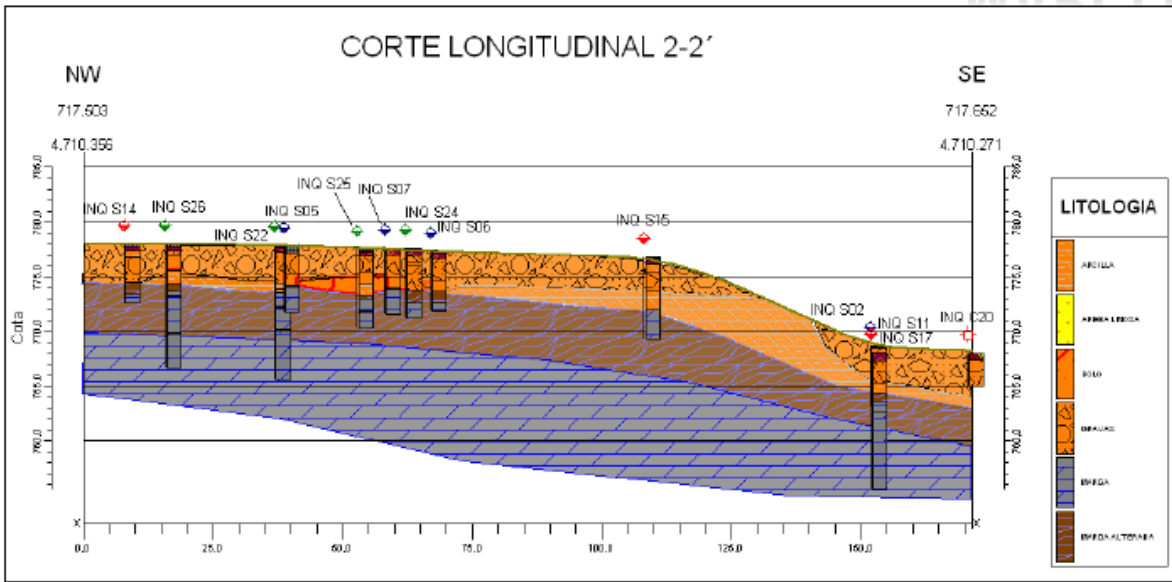


INVESTIGACIÓN:

Entradas: precipitación
Conexión embalse
Salidas: marga alterada,
 talud, embalse

MARCO GEOLÓGICO INQUINOSA

SUPERFICIE DE CONTACTO CUATERNARIO- MARGA CONTROL PALEOTOPOGRÁFICO DEL FLUJO



RED DE SONDEOS EN INQUINOSA

RED DE 31 SONDEOS PARA MONITORIZACIÓN



Vertedero de Sardas



PRODUCTORES DE RESIDUOS:

- URBANOS
- CONSTRUCCION
- INDUSTRIA DEL ALUMINIO
- INDUSTRIA CLOROPOTASAS
- INDUSTRIA PESICIDAS
- INDUSTRIA DEL FOSFORO

TIPOS DE RESIDUOS:

- URBANOS.
- DE CONSTRUCCIÓN.
- ESCORIAS
- ACEITES-HIDROCARBUROS (Laminados, emulsiones, etc.)
- TORTAS DE FILROS
- CINa-ClK
- SOSA, HIPOCLORITO
- LODOS DE DEPURACIÓN
- MERCURIO
- DICROMATO
- DITIOCARBAMATOS
- HCH SOLIDOS
- HCH LIQUIDOS
- ETC.

TOTAL : 350.000 m³
HCH SOLIDO: 60.000 T
HCH DNAPL: 3.000 T

Vertedero de Sardas 2009

SURGENCIA CON DNAPL



SURGENCIA CON DNAPL



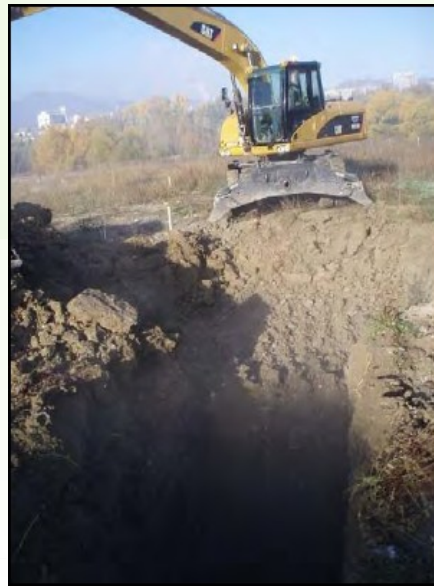
SURGENCIA CON LIXIVIADOS BÁSICOS



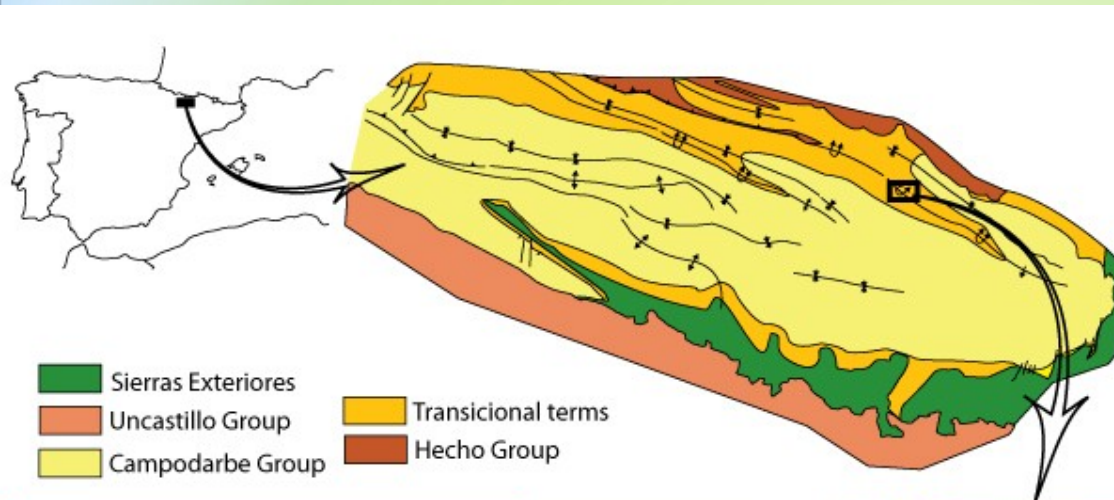
LIXIVIADOS Y PRECIPITADOS DE SOSA EN LA CUNETETA



TIERRAS IMPREGNADAS DE LIXIVIADOS EN EL PIE DEL VERTEDERO



MARCO GEOLÓGICO SARDAS

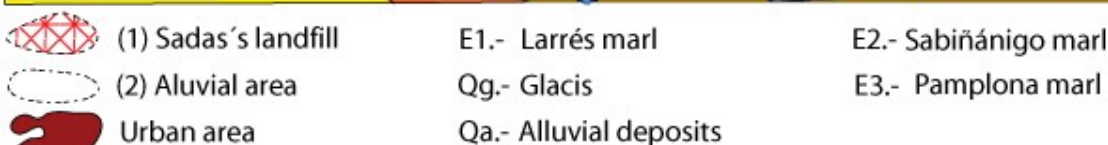
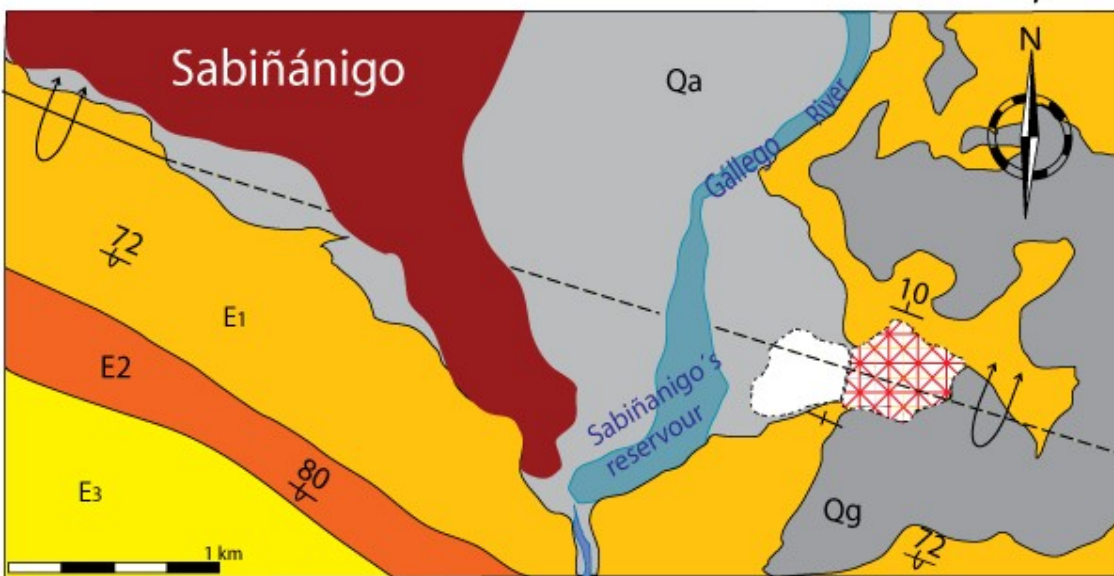


Litología:

Sustrato en margas
 Glacis limoarenoso
 Aluvial con gravas y arenas
 Limos glaciolacustres

Estructura:

Pliegue en rodilla
 Buzamiento N suave
 Buzamiento S subvertical
 Fracturas buzamiento N suave
 Eje del pliegue



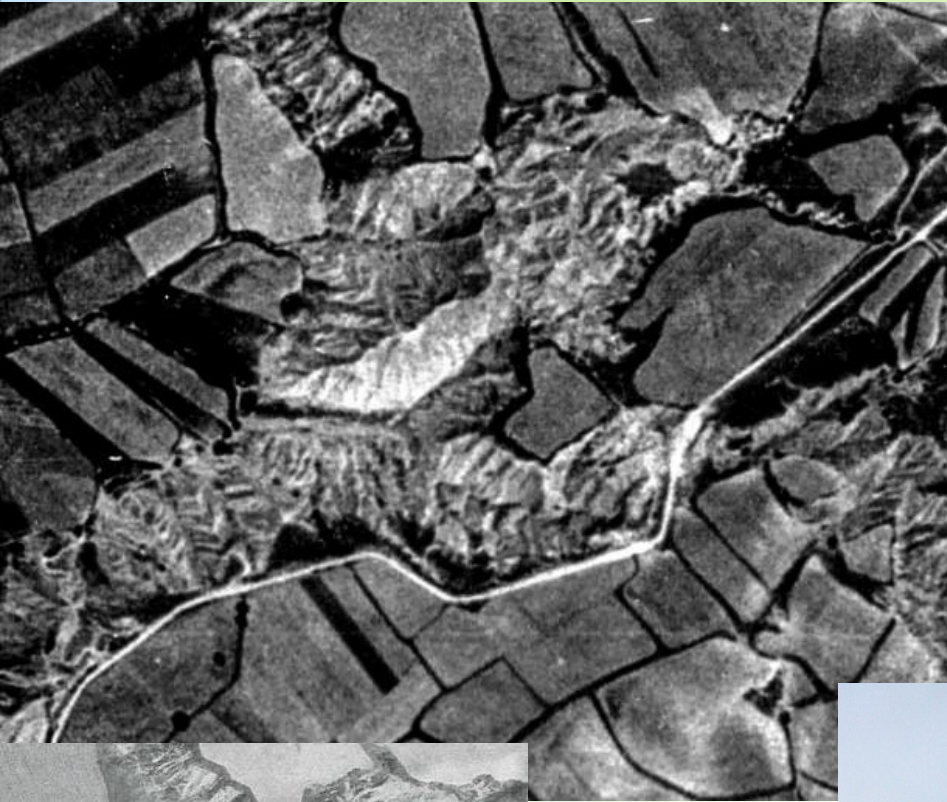
INVESTIGACIÓN:

Entradas: glacis-marga alterada

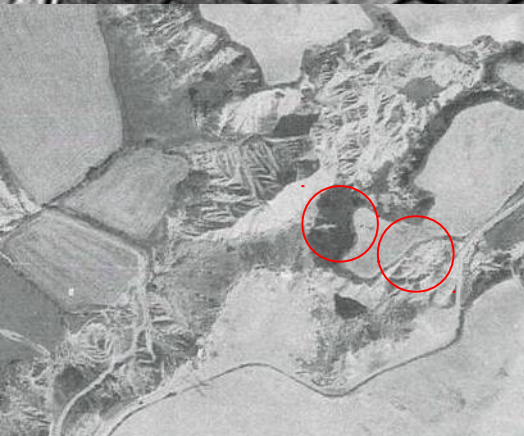
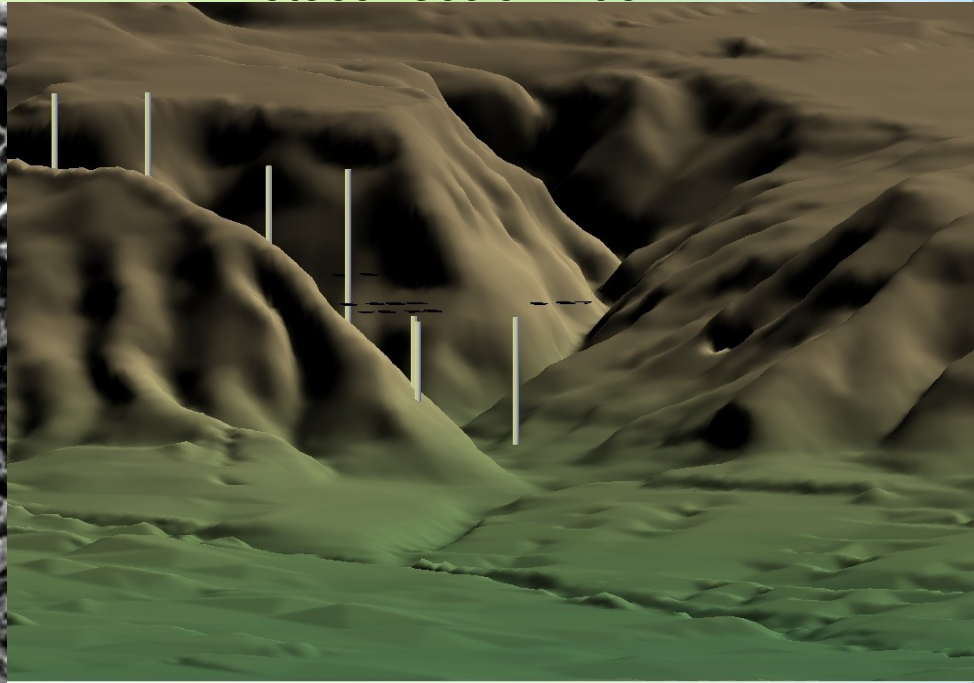
Salidas: marga alterada, Eje del pliegue, Control estructural norteado, Conexión marga-aluvial

FOTOGRAFÍAS HISTÓRICAS. SARDAS

Aérea 1957



Fotocorrección-1957

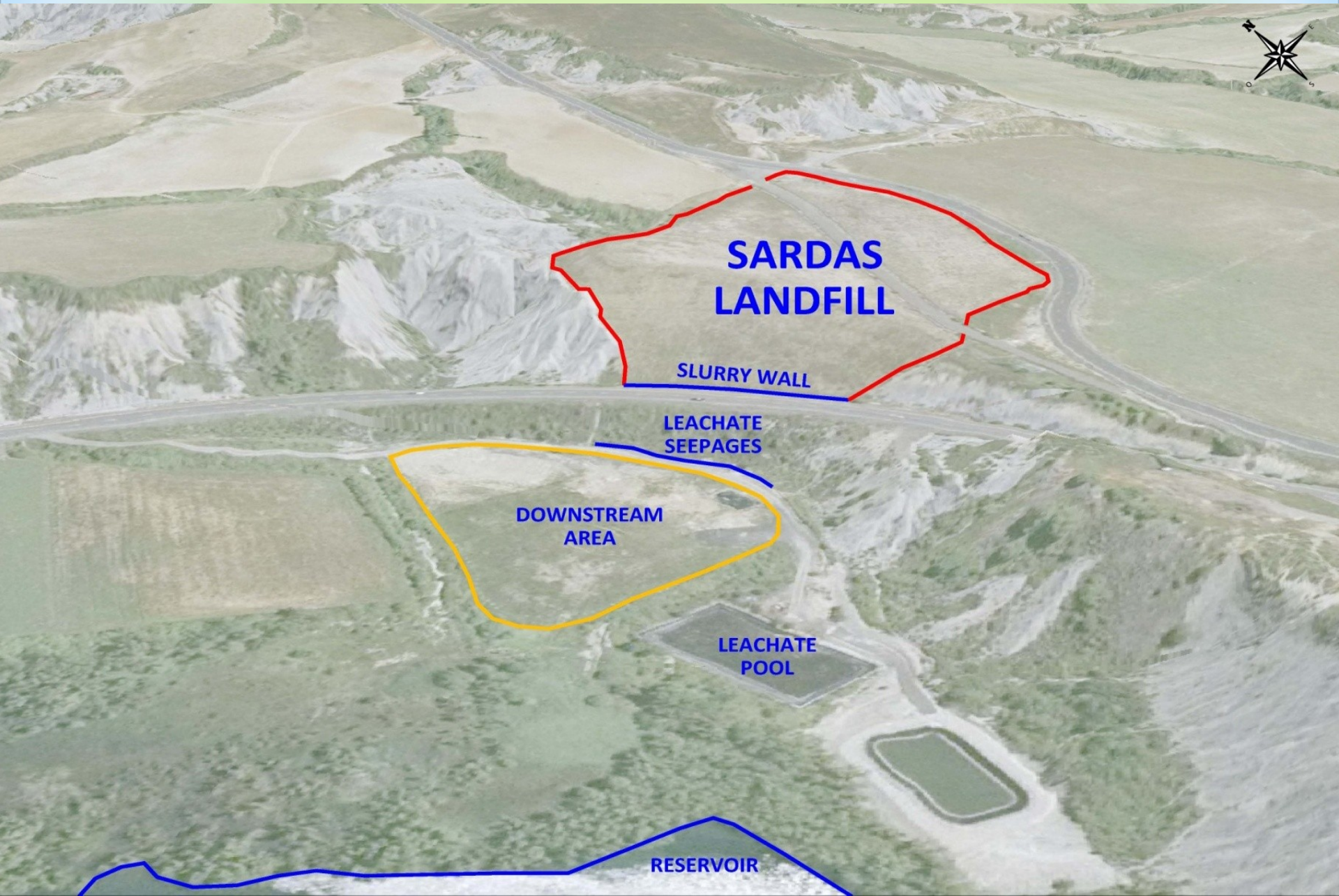


Sardas hoy



Aérea 1977: Donde vertió Inquinosa

VISTA AÉREA DEL VERTEDERO



**SARDAS
LANDFILL**

SLURRY WALL

**LEACHATE
SEEPAGES**

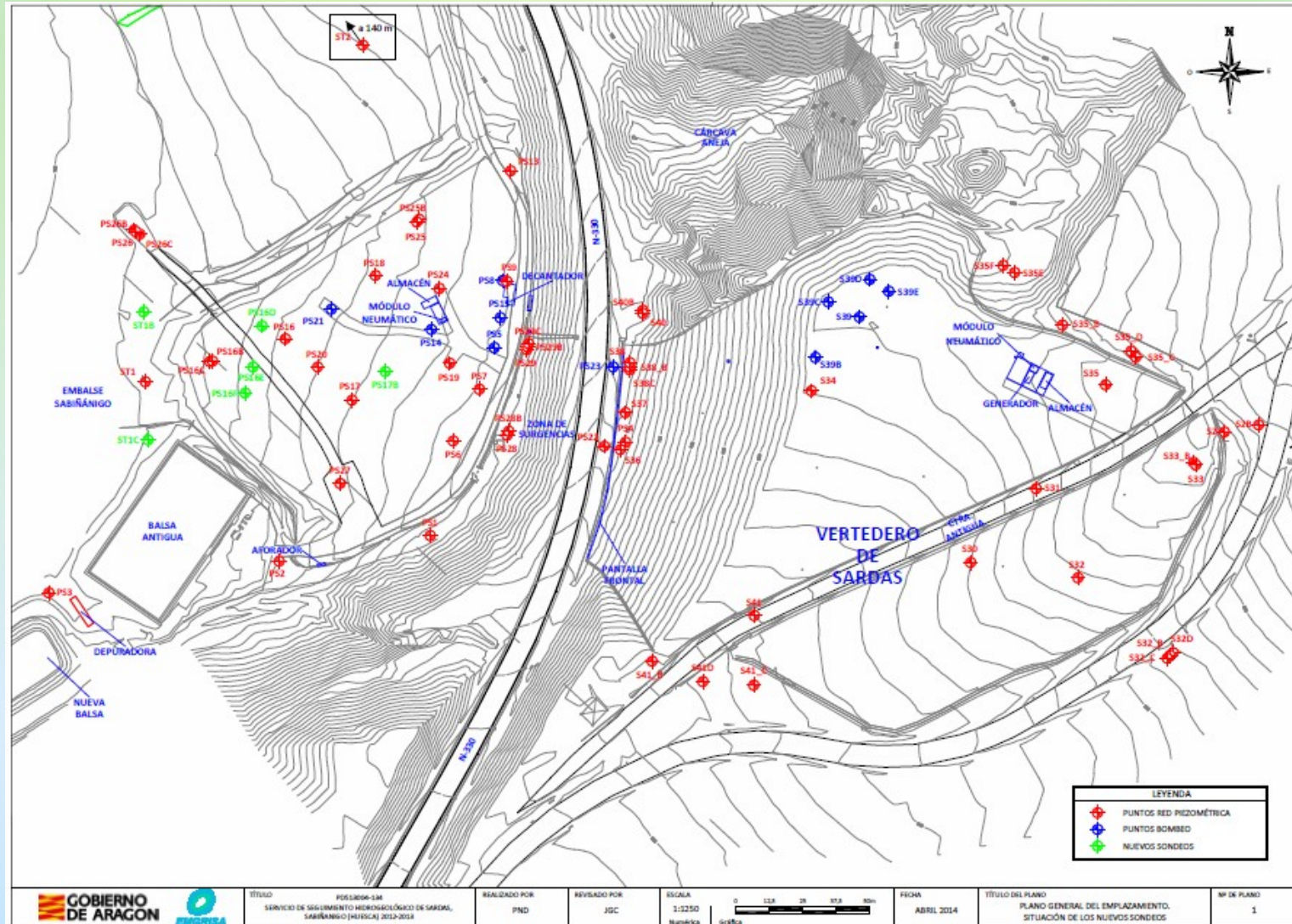
**DOWNSTREAM
AREA**

**LEACHATE
POOL**

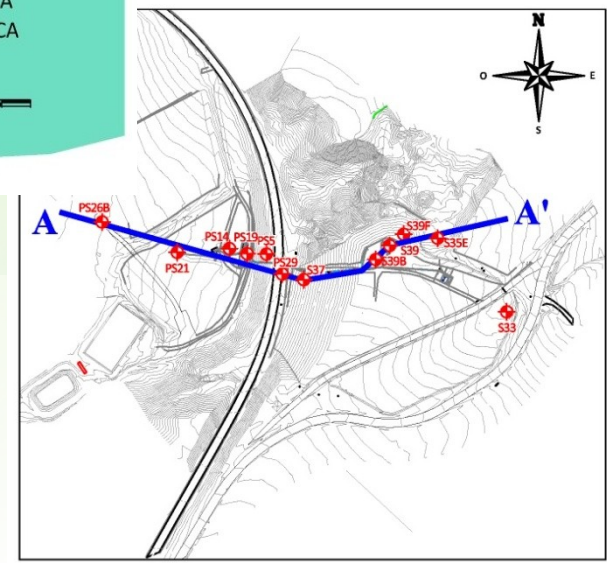
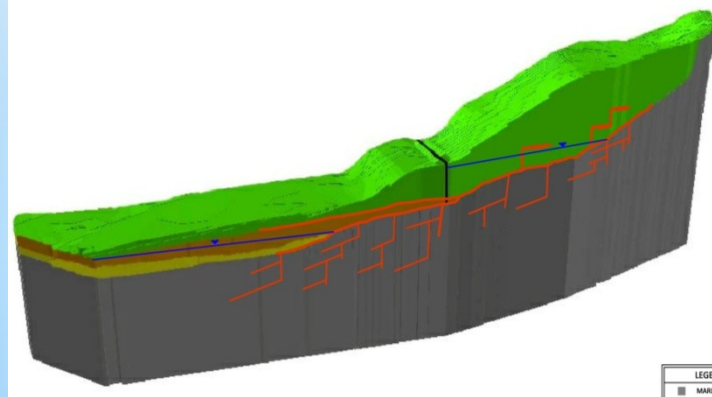
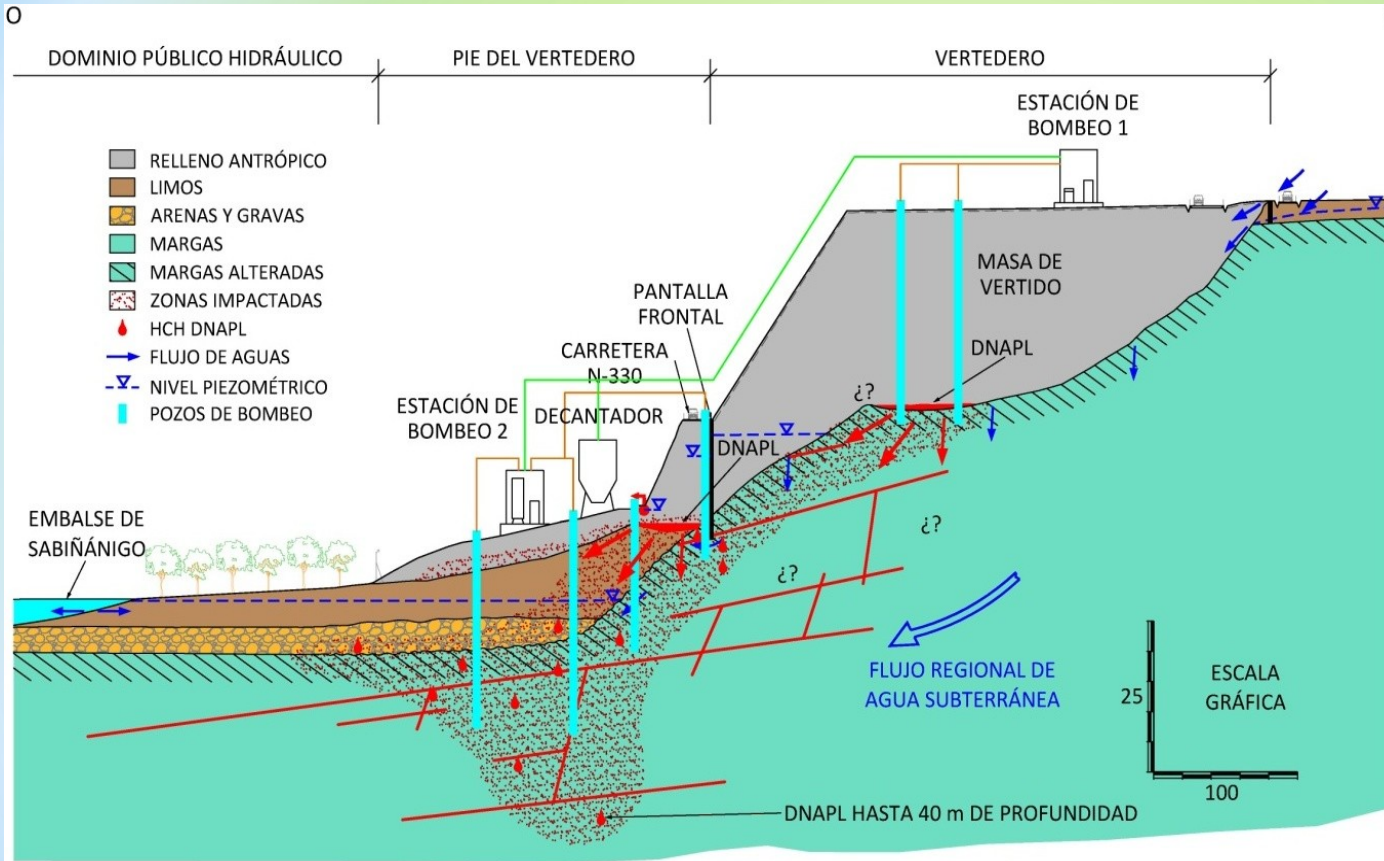
RESERVOIR

RED DE SONDEOS EN SARDAS

RED DE 80 SONDEOS PARA MONITORIZACIÓN
RED DE 11 SONDEOS EQUIPADOS PARA EXTRACCIÓN

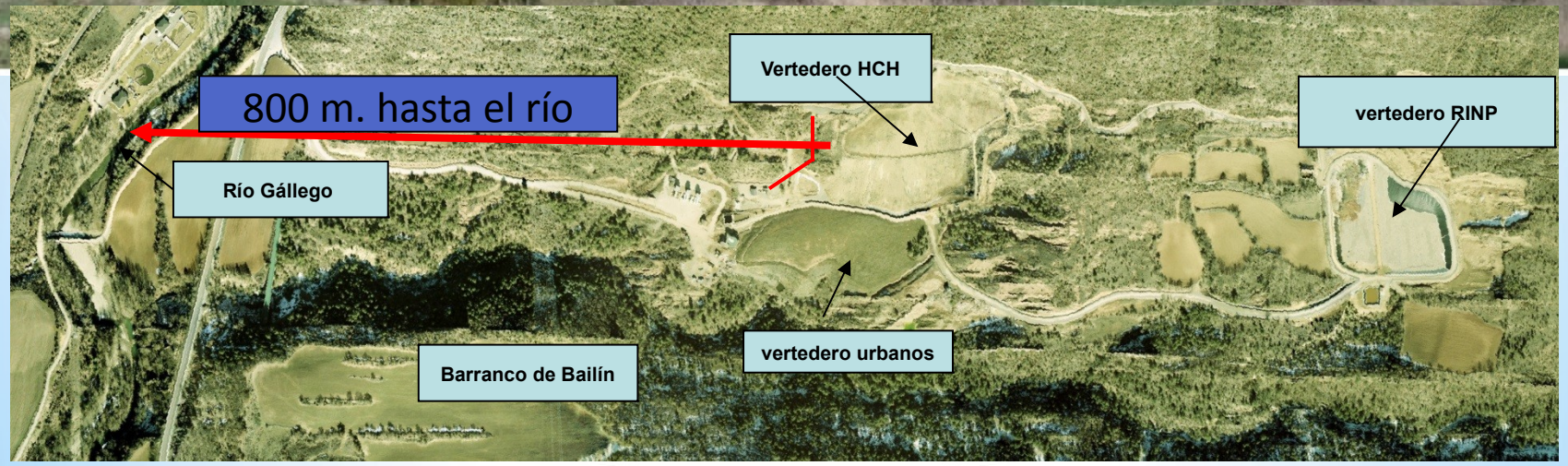


MODELO CONCEPTUAL



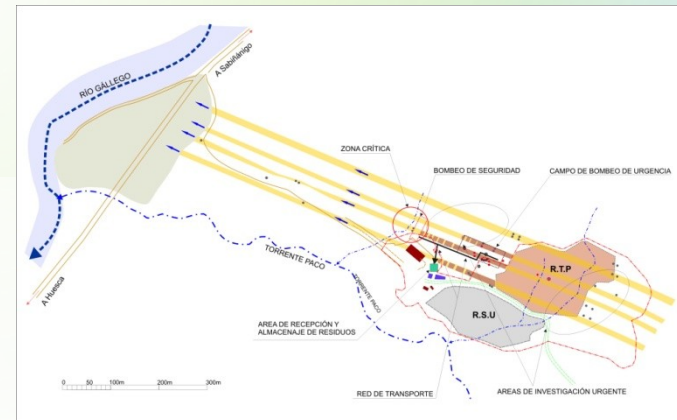
Vertedero de Bailín

VISTA GENERAL DEL EMPLAZAMIENTO



DATOS BÁSICOS

- * PERIODO DE OPERACION: 1984-1992
- * TOTAL RESIDUOS 200.000 m³
 - * URBANOS 20.000 m³
 - * RESIDUOS SÓLIDOS DE HCH 64.000 t
 - * RESIDUOS LÍQUIDOS CON HCH (DNAPL) 2.000-3.000 t
 - * TIERRAS CONTAMINADAS 342.000 t
- * SIN AISLAMIENTO EN LA BASE
- * CUBIERTA SUPERFICIAL CON LÁMINA DE PEAD EN 1996
- * PRESENCIA DE DNAPL
- * CERCANÍA DE CAUCE RECEPTOR: Río Gállego a 1 Km



MARCO GEOLÓGICO BAILÍN

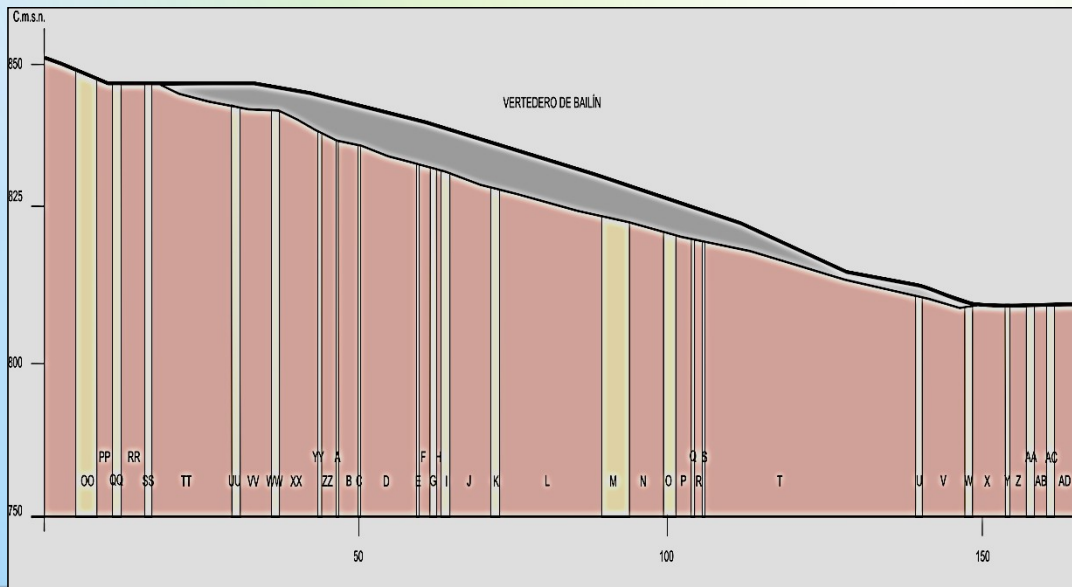


Litología:

Areniscas y conglomerados
Limolitas

Estructura:

Capas subverticales
Fallas transversales a las capas
Fracturación más desarrollada
en las areniscas

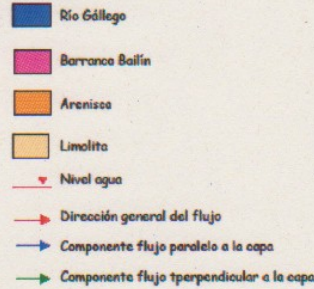
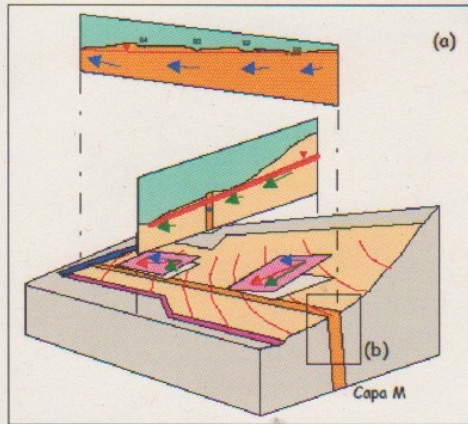


INVESTIGACIÓN:

Por capa de arenisca
Conexión entre capas:
(barrancos-fracturas)

MODELO CONCEPTUAL. BAILÍN

Figura nº 10: Modelo conceptual de flujo: influencia de la geología y la fracturación



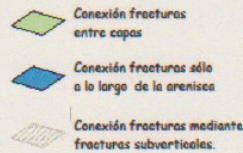
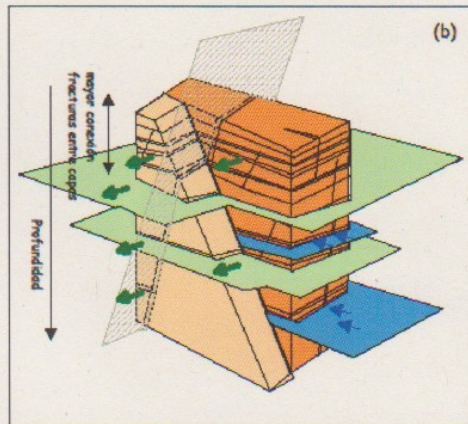
Características geológicas

- Zona distal abanico aluvial.
- Flanco invertido anticlinal
- Estratos subverticales
- Alternancia litológica
- Variación espesores
- Desaparición de capas

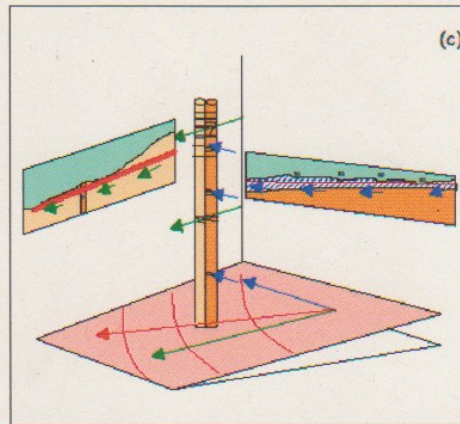
Características hidrogeológicas

- Relación nivel - topografía
- Relación gradientes - zona descarga
- Permeabilidad equivalente, flujo paralelo flujo perpendicular a las capas.

Bloque y cortes esquemáticos del flujo en la zona de estudio.



Esquema flujo condicionado por la geología y la red de fracturación

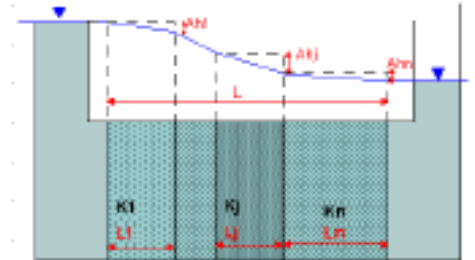


Aplicación del modelo conceptual en la testificación de sondeos.

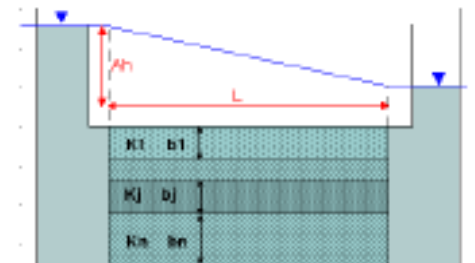
ALTERNANCIA DE CAPAS CON DISTINTO GRADO DE PERMEABILIDAD Y FRACTURACIÓN

FRACTURAS COMUNICADAS EN ZONAS Y CON DIRECCIONES PREFERENTES FRACTURAS AISLADAS

CAPAS DE ARENISCAS CON DNAPL. FLUJO POR COREDORES PREFERENTES



Ley de Darcy aplicada a medios heterogéneos con flujo perpendicular a la estratificación o flujo en serie



Ley de Darcy aplicada a medios heterogéneos con flujo paralelo a la estratificación

DESCONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO

Tiempo



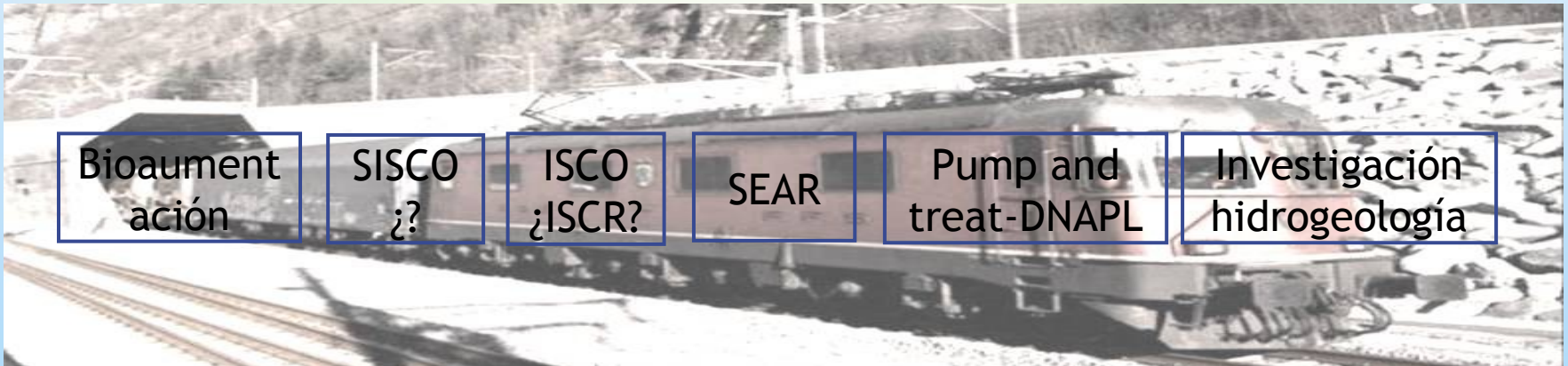
Investigación y seguimiento hidrogeológico

Ensayos de laboratorio

Pruebas piloto

Aplicación a gran escala

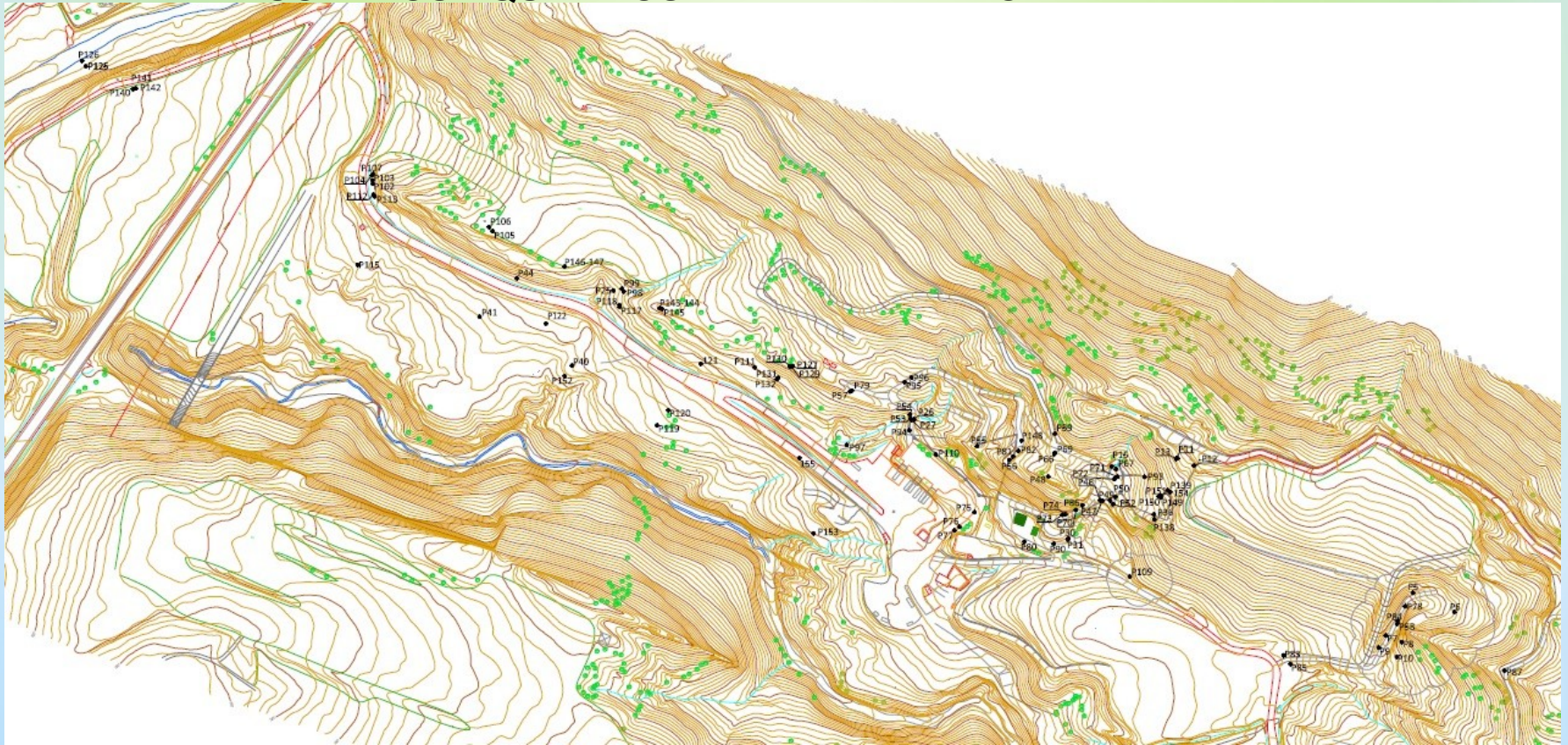
AISLAMIENTO, TRASLADO O
ELIMINACIÓN DE LOS FOCOS



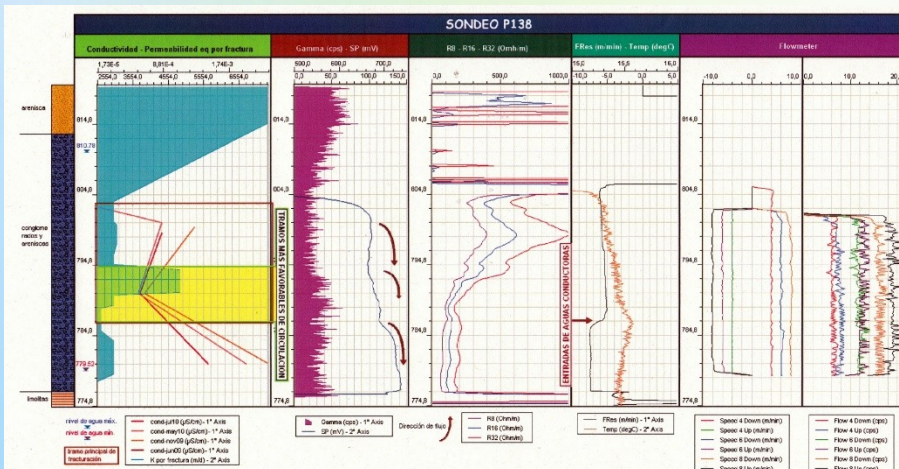
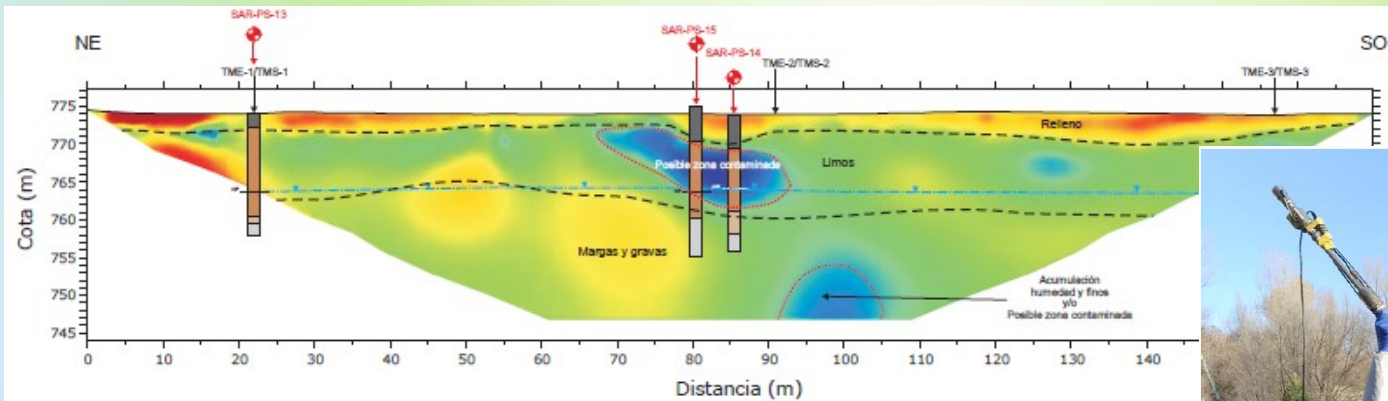
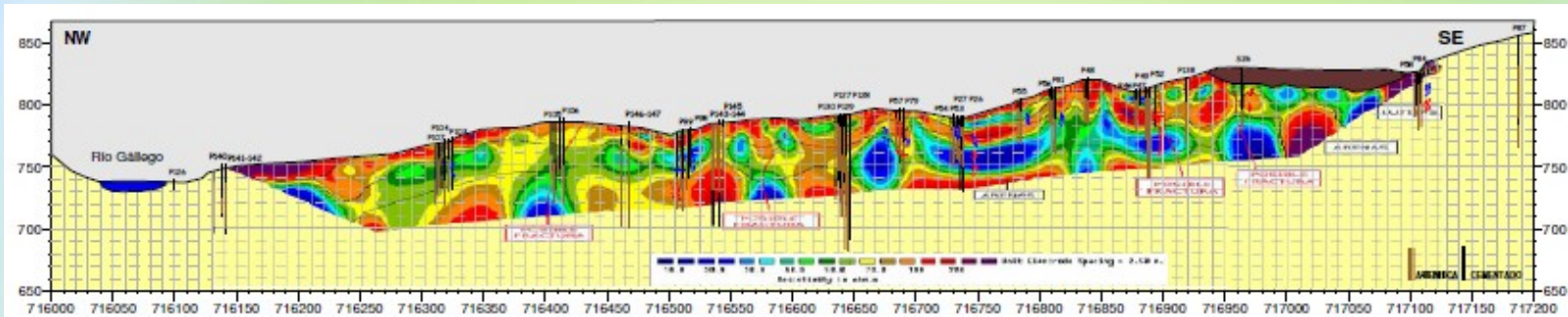
Investigación: RED DE SONDEOS EN BAILIN

- SON LA HERRAMIENTA BÁSICA DE INVESTIGACIÓN Y REMEDIACIÓN:

- RED DE 200 SONDEOS PARA MONITORIZACIÓN
- RED DE 27 SONDEOS EQUIPADOS PARA EXTRACCIÓN



Investigación: Ensayos hidrogeológicos, Geofísica.



Investigación: SEGUIMIENTO DE NIVELES.

PRINCIPAL HERRAMIENTA DE INVESTIGACIÓN

INSTRUMENTAL:

- Sonda hidronivel: piezómetros sin fase
- Sonda de interfase: piezómetros con fase libre
- Transductores de presión (divers)

FRECUENCIA:

- Diaria, horaria, minutos: estudios puntuales, ensayos, sondeos de gran interés, sondeos de nueva ejecución
- Semanal: sondeos implicados en labores de extracción, frente de pluma, sondeos de nueva ejecución
- Mensual: Todos los que tienen significado hidrogeológico
- Trimestral: Todos

OBJETIVO:

- Evolución temporal del acuífero, evolución estacional, respuesta a precipitaciones o modificaciones en el acuífero
- Avance-retroceso de la pluma de fase libre
- Ensayos: descensos-recuperaciones, influencia en otros sondeos



Investigación: SEGUIMIENTO ANALÍTICO

* OBJETIVOS:

- * Caracterización de la pluma
- * Funcionamiento hidrogeológico: zonas de recarga, conexión fracturas-vías de flujo, variación estacional
- * Influencia de bombeos
- * Balances contaminantes, descargas a receptores

* SELECCIÓN PUNTOS DE MUESTREO:

- * Campañas trimestrales, 50 muestras.
- * Significado hidrogeológico
- * Campañas previas de conductividad-temperatura

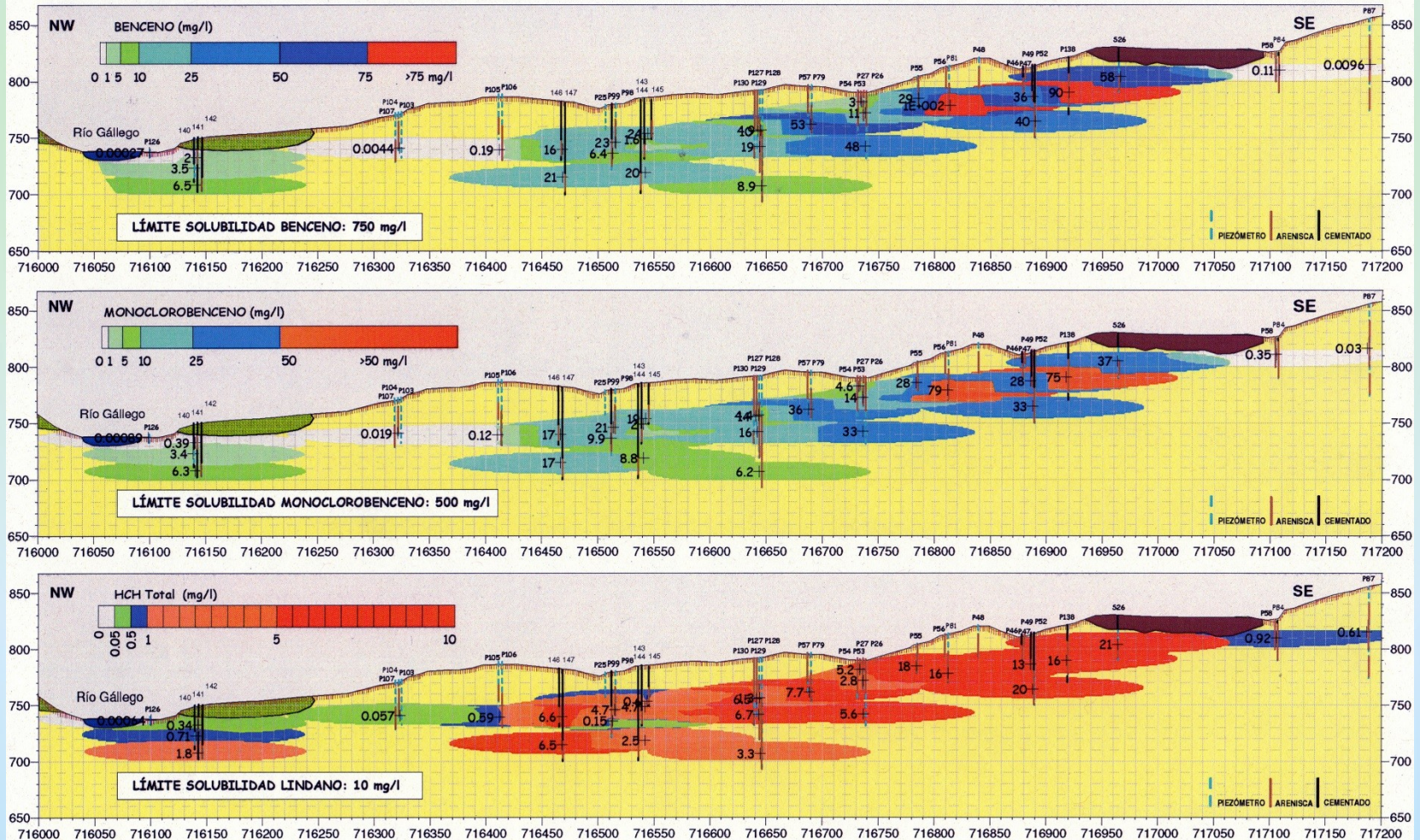
* METODOLOGÍA:

- * bomba bladder y celda de flujo : mezcla mínima de aportes de diferentes niveles y sin aireación de la muestra, medida de parámetros físico-químicos con flujo continuo, preservando las condiciones de oxidación del sistema.
- * Laboratorio: En las propias instalaciones, con duplicados y muestras ciegas.
- * Parámetros: fisicoquímicos, cationes-aniones mayoritarios, Fe^{2+} - Fe^{3+} , Contaminantes orgánicos principales (benceno, clorobencenos, fenol, clorofenoles, isómeros HCH)



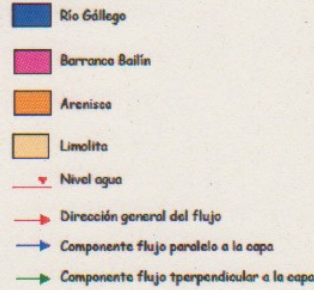
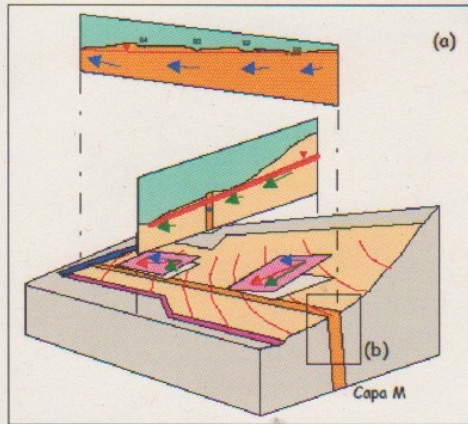
Investigación: SEGUIMIENTO ANALÍTICO

PLAN DE SEGUIMIENTO Y CONTROL DEL VERTEDERO DE HCH DE BALIN PLUMA DE AFECCIÓN CAPA M. CAMPAÑA MARZO 2011.



MODELO CONCEPTUAL. BAILÍN

Figura nº 10: Modelo conceptual de flujo: influencia de la geología y la fracturación



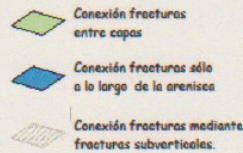
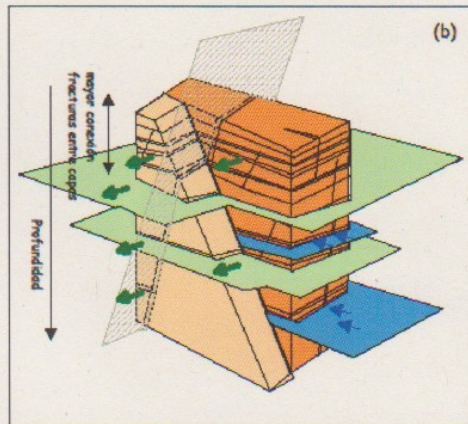
Características geológicas

- Zona distal abanico aluvial.
- Flanco invertido anticlinal
- Estratos subverticales
- Alternancia litológica
- Variación espesores
- Desaparición de capas

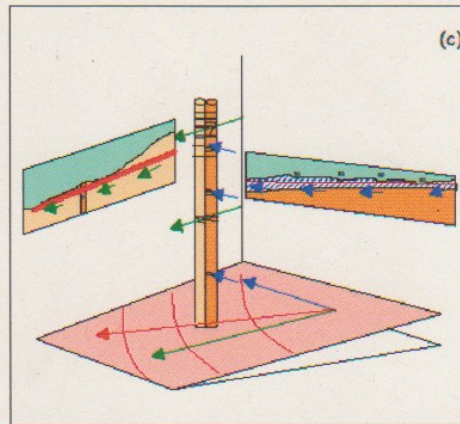
Características hidrogeológicas

- Relación nivel - topografía
- Relación gradientes - zona descarga
- Permeabilidad equivalente, flujo paralelo flujo perpendicular a las capas.

Bloque y cortes esquemáticos del flujo en la zona de estudio.



Esquema flujo condicionado por la geología y la red de fracturación

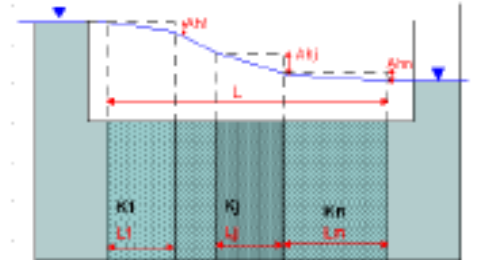


Aplicación del modelo conceptual en la testificación de sondeos.

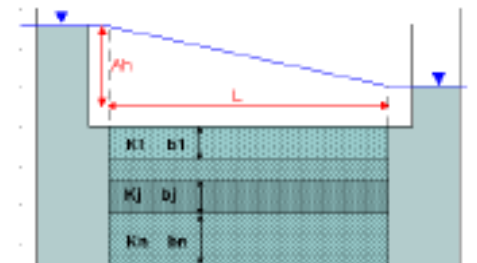
ALTERNANCIA DE CAPAS CON DISTINTO GRADO DE PERMEABILIDAD Y FRACTURACIÓN

FRACTURAS COMUNICADAS EN ZONAS Y CON DIRECCIONES PREFERENTES FRACTURAS AISLADAS

CAPAS DE ARENISCAS CON DNAPL. FLUJO POR COREDORES PREFERENTES



Ley de Darcy aplicada a medios heterogéneos con flujo perpendicular a la estratificación o flujo en serie



Ley de Darcy aplicada a medios heterogéneos con flujo paralelo a la estratificación

MODELO MATEMÁTICO

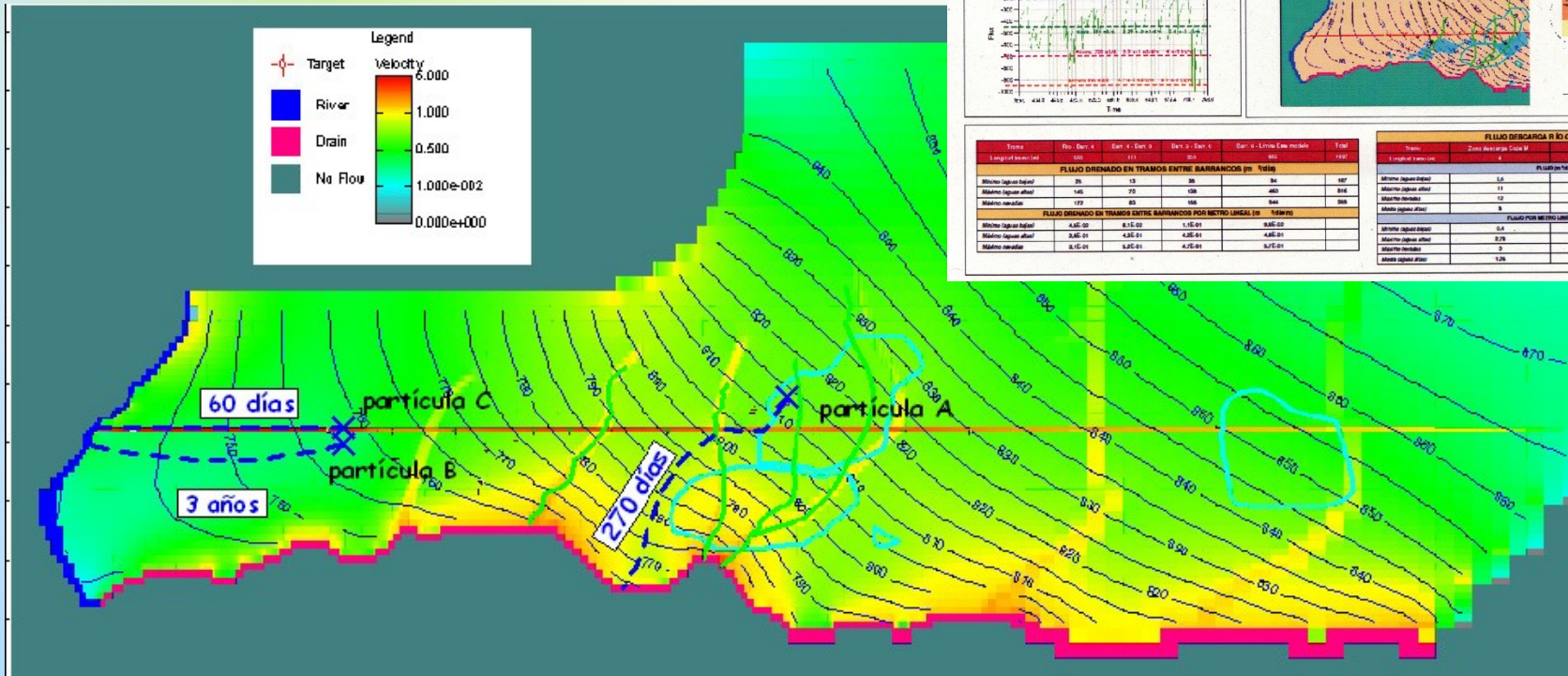
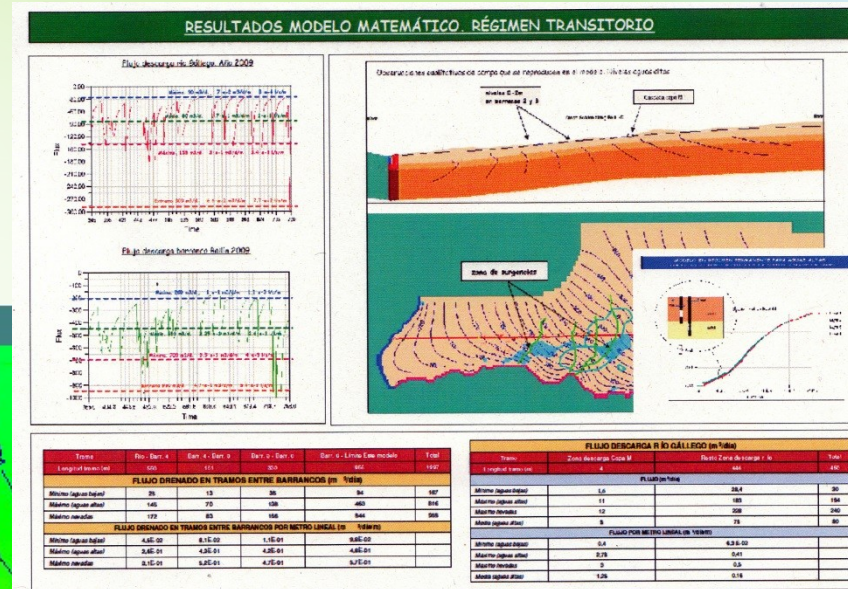
MEDIO FRACTURADO DE BAJA PERMEABILIDAD, ASIMILADO ACUÍFERO POROSO MULTICAPA (basado en código Modflow)

OBJETIVOS:

BALANCE DE DESCARGAS:

- Total de las capas al río Gállego: 68 m³/día
- Capa M: 5 m³/día
- Barranco de Bailín al río Gállego: 305 m³/día

CONTROL Y SIMULACIÓN DESDE EL FOCO HASTA EL RÍO
ESCENARIOS PARA LA REMEDIACIÓN

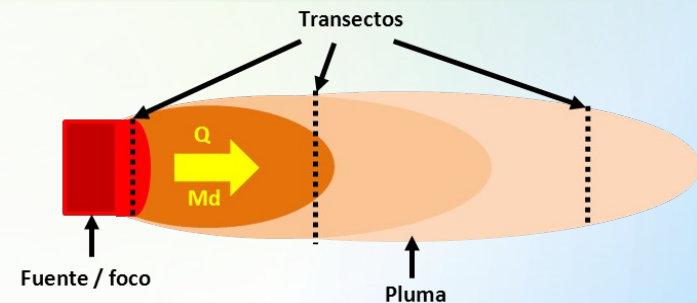
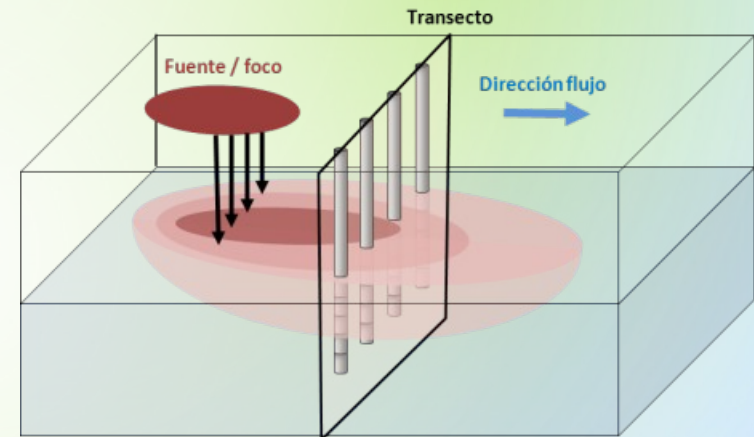
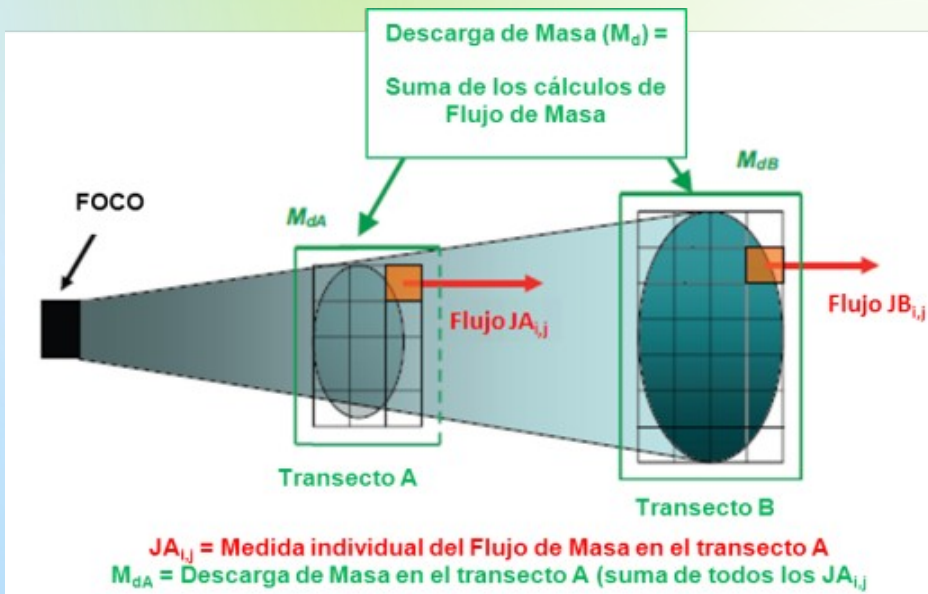


Investigación: PASSIVE FLOW METER

¿POR DONDE SE MUEVE EL CONTAMINANTE?

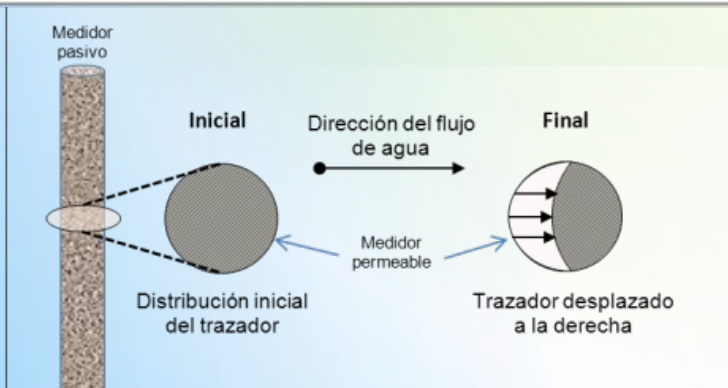
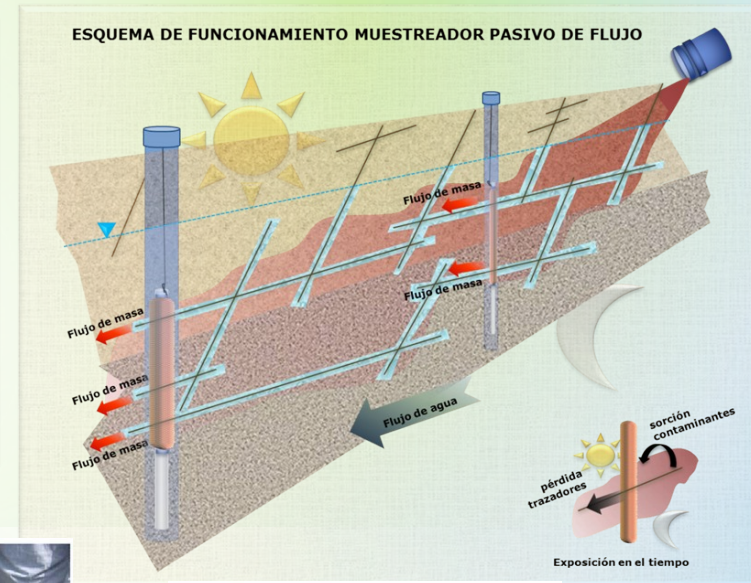
Flujo de masa (J): es la masa de un compuesto químico que pasa a través de un plano perpendicular a la dirección de flujo por unidad de tiempo y por unidad de área (g/m²/día)

Descarga de masa (Md): la descarga de masa representa el total de la masa contaminante que es transportada por el agua subterránea (g/día). La descarga de masa integra todos los cálculos de flujo de masa en una zona determinada

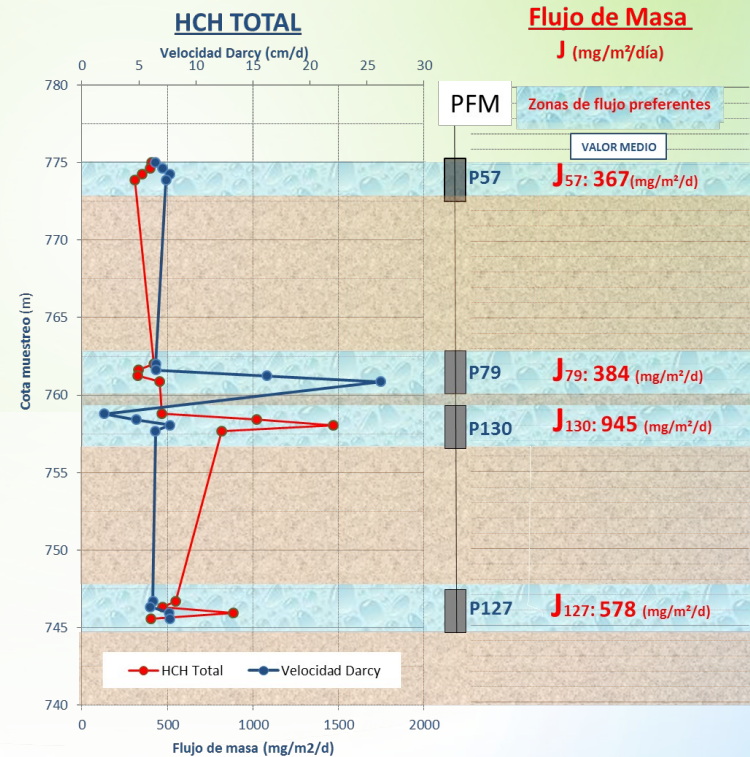
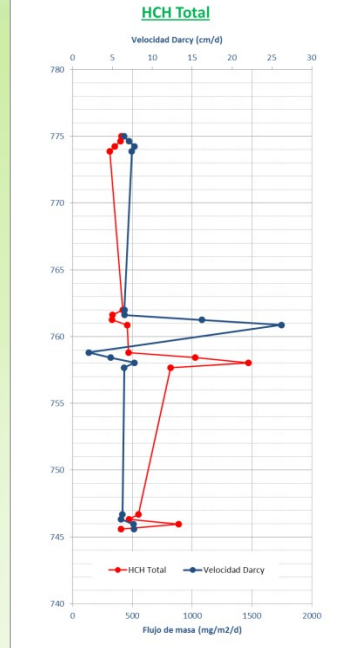
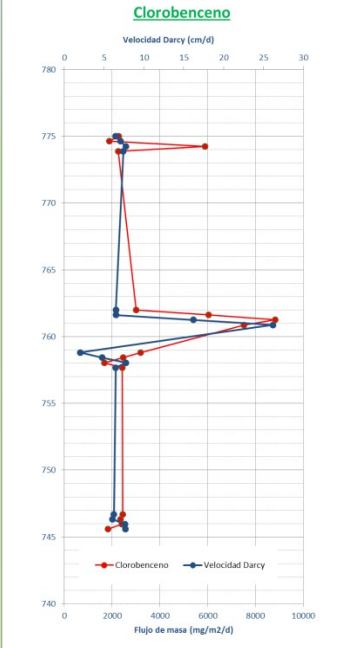
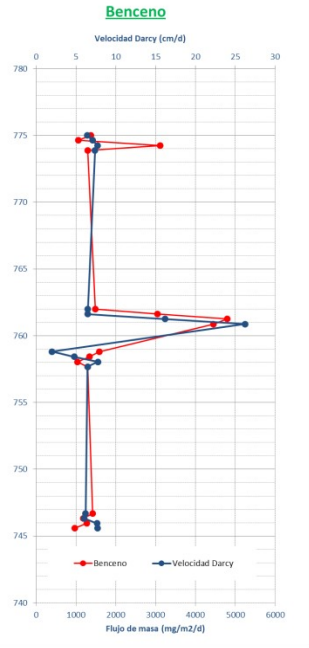


Investigación: PASSIVE FLOW METER

- VENTAJAS: PERMITE DISCRETIZAR POR TRAMOS VOLUMEN-MASA. IDÓNEO PARA MEDIOS FRACTURADOS
- LIMITACIONES: FLUJO VERTICAL DESPRECIABLE



Perfiles Flujo de masa y velocidad de Darcy



Flujo de Masa
 J (mg/m²/día)

Descarga de Masa
 M_d (mg/d)

Apertura Fractura: 4 mm – 1cm
Ancho capa M: 4 m
4 fracturas por PFM → Área circulación flujo 0,256 m² · 0,64 m²

TRANSECTO CONTROL

$M_{d57}: 9 - 21$ (g/año)

$M_{d79}: 9 - 22$ (g/año)

$M_{d130}: 22 - 55$ (g/año)

$M_{d127}: 13 - 34$ (g/año)

M_d total: 53 – 133 (g/año)

SELECCIÓN DE TÉCNICAS DE TRATAMIENTO

CONDICIONANTES: CONTAMINACIÓN MULTICOMPONENTE. CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LOS CONTAMINANTES

Compuesto Químico	CAS	Estado Físico	Peso molecular (g/mol)	Densidad (g/ml a 20°C)	Solubilidad (mg/l)	Punto de ebullición aprox. (°C)	Presión de Vapor (mmHg)	H'	LogKoc
COMPUESTOS VOLÁTILES (COV)									
Benceno	71-43-2	L	78,1	0,878	1.770	80	95,0	0,227	1,82
Clorobenceno	108-90-7	L	112,6	1,106	502	132	12,1	0,182	2,33
1,3 Diclorobenceno (m-)	541-73-1	L	147,0	1,289	110	173	2,3	0,195	2,23
1,2 Diclorobenceno (o-)	95-50-1	L	147,0	1,301	150	179	1,4	0,087	2,84
1,4 Diclorobenceno (p-)	106-46-7	S	147,0	1,290	73,8	173	1,1	0,117	2,81
COMPUESTOS SEMVOLÁTILES (SCOVs)									
1,2,3 Triclorobenceno	87-61-6	L	181,4	-	16,4	218	0,06	0,038	3,95
1,2,4 Triclorobenceno	120-82-1	L	181,4	1,454	48,8	214	0,34	0,059	3,22
1,3,5 Triclorobenceno	108-70-3	S	181,4	-	18,2	208	0,11	0,060	3,40
1,2,3,5 Tetraclorobenceno	634-90-2	S	215,9	-	5,2	246	0,01	0,024	3,80
1,2,4,5 Tetraclorobenceno	95-94-3	S	215,9	-	0,3	240	0,005	0,050	3,20
Fenol	108-95-2	S	94,1	1,074	87.000	182	0,46	0,00002	1,24
3 Clorofenol (m-)	108-43-0	S	128,6	1,268	41.131	175	0,05	0,00001	2,05
2 Clorofenol (o-)	95-57-8	L	128,6	1,260	28.000	214	1,42	0,001	2,46
4 Clorofenol (p-)	106-48-9	S	128,6	1,297	28.650	220	0,041	0,00001	2,09
2,4 Diclorofenol	120-83-2	S	163,0	-	4.500	209	0,072	0,0001	1,86
2,6 Diclorofenol	87-65-0	S	163,0	-	102,9	218	0,150	0,00001	1,35
2,4,6 Triclorofenol	88-06-2	S	197,4	-	982	246	0,012	0,0003	2,12
2,3,4,5 Tetraclorofenol	4901-51-3	S	231,9	-	295,5	-	0,00005	0,000002	2,66
2,3,4,6 Tetraclorofenol	58-90-2	S	231,9	-	100	-	0,005	0,0003	2,02

La gran variedad de compuestos con propiedades fisicoquímicas muy contrastadas condicionan que las técnicas convencionales presenten limitaciones para tratar el rango completo de constituyentes.

Compuesto Químico	CAS	Estado Físico	Peso molecular (g/mol)	Densidad (g/ml a 20°C)	Solubilidad (mg/l)	Punto de ebullición aprox. (°C)	Presión de Vapor (mmHg)	H'	LogKoc
COMPUESTOS SEMVOLÁTILES (SCOVs)									
2,3,5,6 Tetraclorofenol	935-95-5	S	231,9	-	2,0	-	0,001	0,006	1,40
Pentaclorobenceno	608-93-5	S	250,3	-	0,6	275	0,002	0,032	4,50
Tetraclorociclohexenos	319-81-3	S	219,9	-	43,0	-	0,031	0,075	-
beta-Pentaclorociclohexeno	54083-25-9	S	254,4	-	11,5	-	0,006	0,054	-
gamma-Pentaclorociclohexeno	319-94-8	S	254,4	-	11,5	-	0,006	0,054	-
1,3,4,5,6 Pentaclorociclohexeno	643-15-2	S	254,4	-	11,5	-	0,006	0,054	-
alpha-Hexaclorociclohexano (α-HCH)	319-84-6	S	290,8	1,870	2,0	228	0,00004	0,0003	3,12
beta-Hexaclorociclohexano (β-HCH)	319-85-7	S	290,8	1,890	0,5	-	0,0000005	0,00001	3,14
delta-Hexaclorociclohexano (δ-HCH)	319-86-8	S	290,8	-	2,6	-	0,00003	0,0002	3,93
gamma-Hexaclorociclohexano (LINDANO, γ-HCH)	58-89-9	S	290,8	1,850	5,8	288	0,00004	0,0001	3,04
epsilon-Hexaclorociclohexano (ε-HCH)	6108-10-7	S	290,8	-	-	-	-	-	-
Hexaclorociclohexano grado técnico (TECH-HCH)	608-73-1	-	290,8	-	43,5	< 350	0,00016	0,0001	3,38
Otros Isómeros HCH	-	S	290,8	-	-	-	-	-	-

SELECCIÓN DE TÉCNICAS DE TRATAMIENTO

CONDICIONANTES: PRESENCIA DE FASE DENSA Y FASE DISUELTA

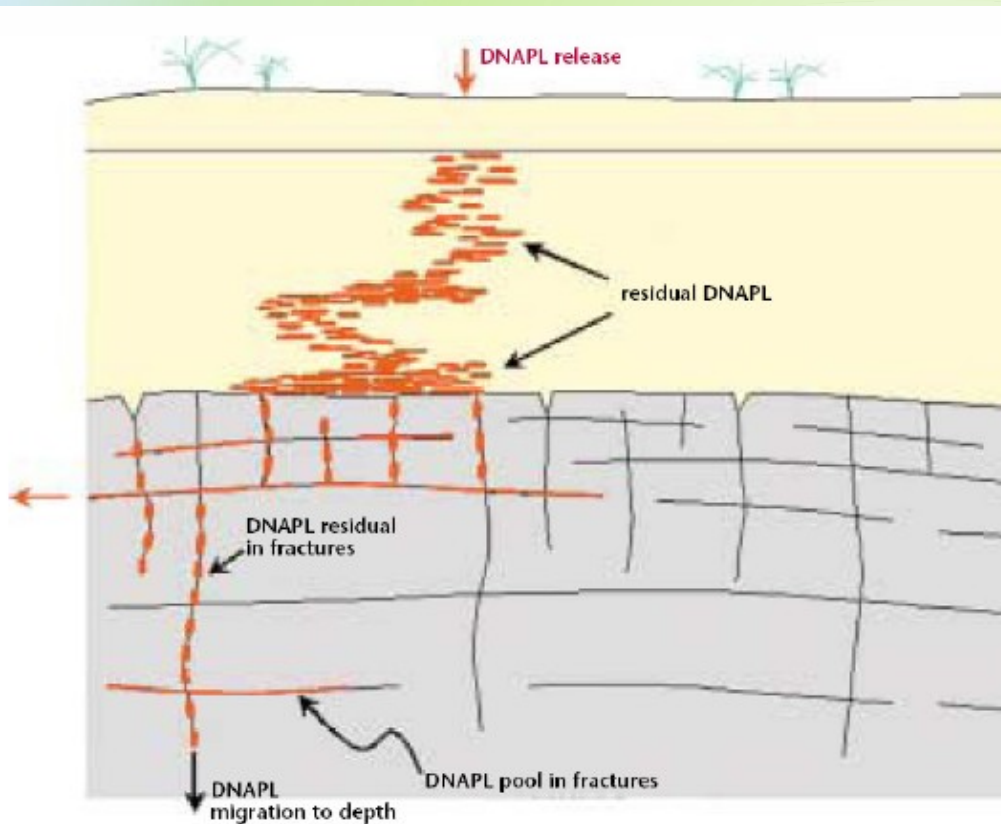


Imagen 1. Movimiento de DNAPL en el medio subterráneo (Environmental Agency, UK)

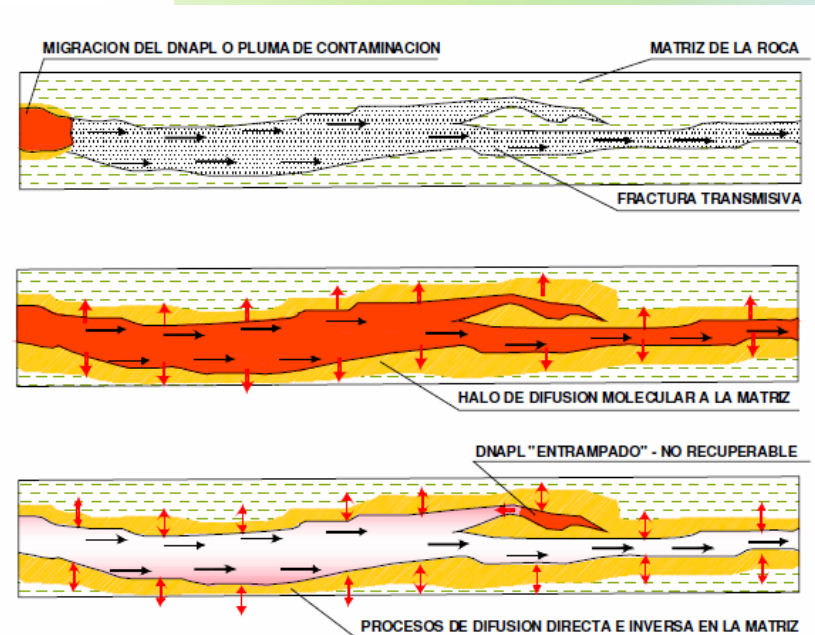


Imagen 2. Procesos de difusión molecular en la matriz

La fase disuelta se mueve de forma "homogénea", con movimiento "darcyano", el movimiento del DNAPL está controlado por la gravedad, densidad y viscosidad, con mayor retención en la matriz.

SELECCIÓN DE TÉCNICAS DE TRATAMIENTO

• CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS

• BAILIN:

- MEDIO FRACTURADO
- MULTICAPA VERTICALIZADO
- VIAS PREFERENTES

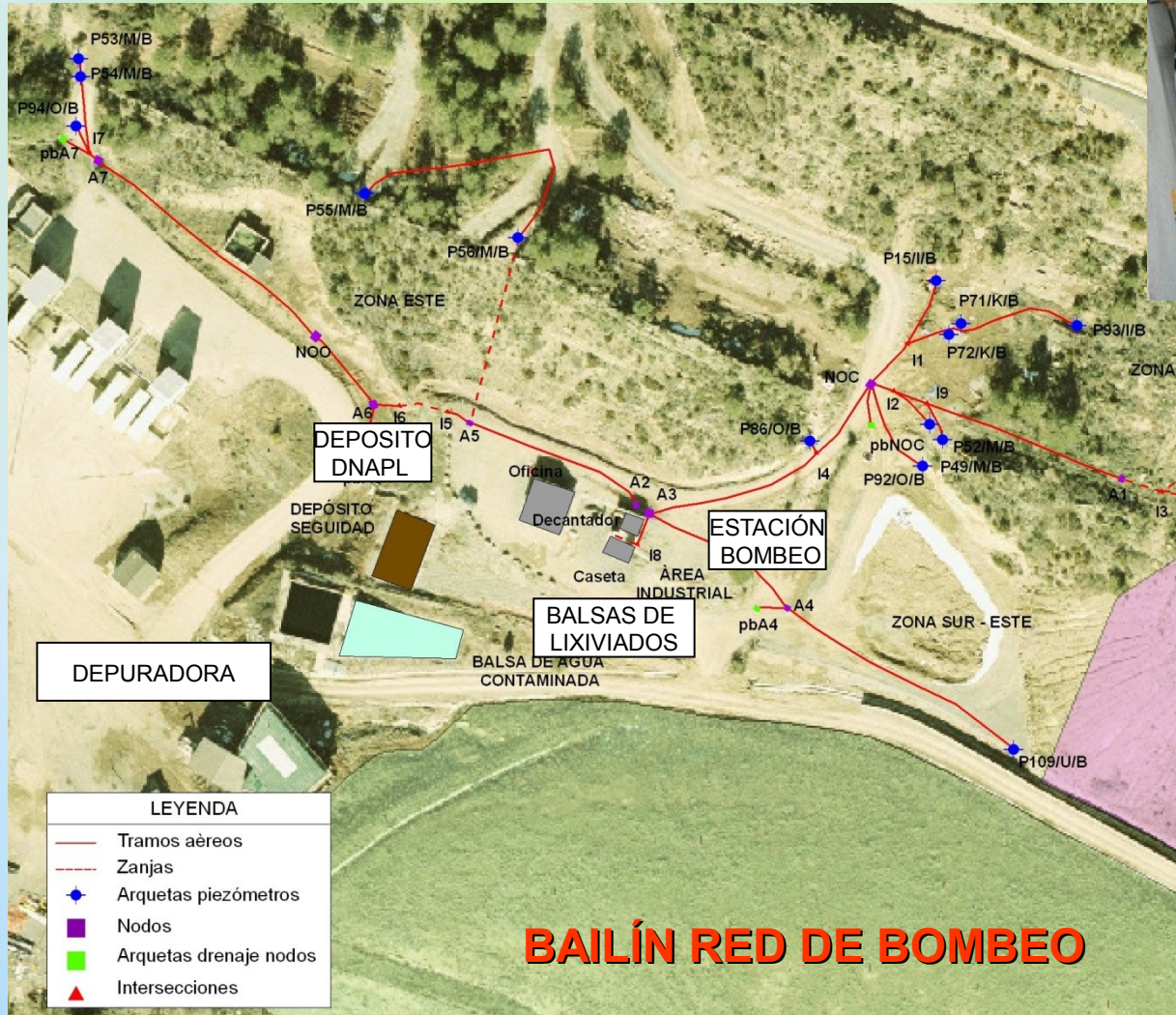
• SARDAS:

- VERTEDERO: RESIDUOS, SATURACIÓN
- DETRÍTICO: LIMOS, GRAVAS
- EMBALSE: BARRERA HIDRÁULICA. EFECTO MAREA

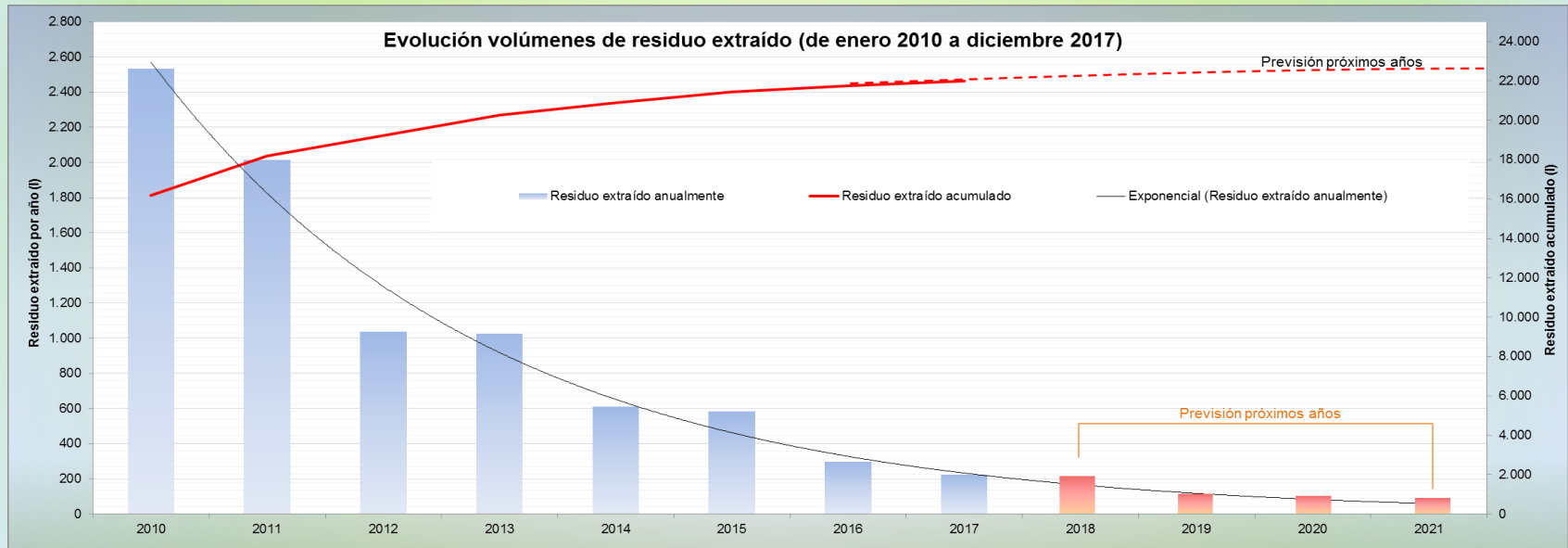
• INQUINOSA:

- DETRÍTICO
- CONTROL PALEOTOPOGRÁFICO
- POCO ESPESOR SATURADO

Pump and treat-DNAPL



Pump and treat-DNAPL



BOMBEO – AGOTAMIENTO – FASE RESIDUAL – ENTRA LA QUÍMICA

PRUEBAS DE LABORATORIO :

AGUAS:

SEAR: SURFACTANT ENHANCED AQUIFER REMEDIATION

ISCO: IN SITU CHEMICAL OXIDATION

ISTD: IN SITU THERMAL DESORTION

ISCR: IN SITU CHEMICAL REDUCTION

SISCO: SURFACTANT- IN SITU CHEMICAL OXIDATION

OTRAS MATRICES: ZVI, BIORREMEDIACION,
ELECTROESTABILIZACIÓN

SEAR. Extracción Mejorada con Surfactantes

OBJETIVO:

- * Obtener una formulación surfactante que mejore los rendimientos de extracción de DNAPL.
- * Biodegradable
- * Desemulsionable: separación del DNAPL. Minimizar gastos de gestión
- * Reutilizable
- * Compatible con ISCO

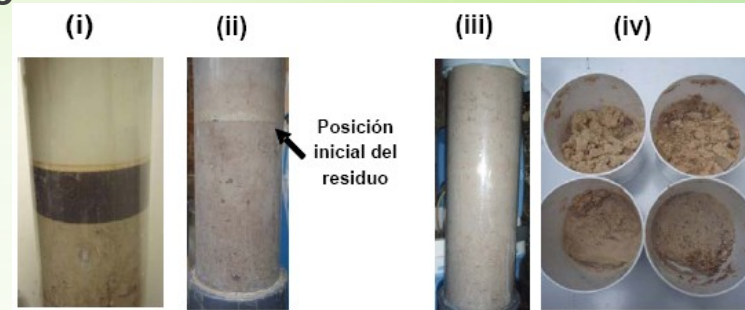
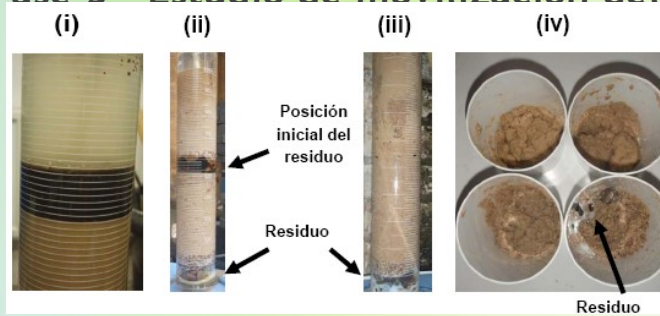
Interacción surfactantes-contaminantes:

- Solubilización:** incrementando la solubilidad de los constituyentes del DNAPL en agua .
- Movilización:** reduciendo la tensión interfacial del DNAPL y el agua subterránea y/o la tensión superficial entre el DNAPL y la roca, para favorecer la migración de la fase orgánica y su recuperación posterior.

SEAR. Extracción Mejorada con Surfactantes

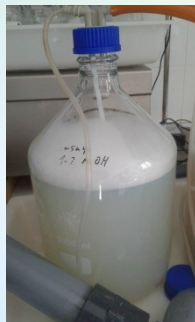
PRIMEROS ENSAYOS

- Fase 1 - Estudio de solubilización: 32 viales con DNAPL y distintas disoluciones surfactantes. Selección de las 5 mezclas que presentan mejores resultados.
- Fase 2 - Ensayos de tratabilidad con roca del emplazamiento
- Fase 3 - Estudio de movilización del residuo



VIA ACTUAL:

- Desemulsionado: modificación del pH
- Compatibilidad con oxidantes: Fenton, persulfato
- Recuperabilidad: carbón activo, stripping



Oxidación Química In Situ, ISCO (In Situ Chemical Oxidation)

Oxidante seleccionado: persulfato sódico

- * Potencial de oxidación lo suficientemente elevado para oxidar el espectro completo de contaminantes de Bailín
- * Durabilidad en el medio frente
- * Elevada solubilidad acuosa que permite trabajar a altas concentraciones
- * La densidad de estas soluciones concentradas permite una migración sujeta a fuerzas gravitacionales
- * puede difundirse a zonas de baja permeabilidad mejor que otros oxidantes;
- * está sujeto a menores procesos de adsorción

ACTIVACIÓN:

- Calor: $S_2O_8^{2-} + T (30 - 45 \text{ }^\circ\text{C}) \rightarrow 2 SO_4^{\cdot -}$
- Quelatos o sales de hierro: $S_2O_8^{2-} + [FeEDTA] \rightarrow SO_4^{\cdot -} + SO_4^{2-} + Fe^{3+}$
- Peróxido de hidrógeno: $S_2O_8^{2-} + H_2O_2 \rightarrow 2 SO_4^{\cdot -} + HO^{\cdot}$
- Activación alcalina: $S_2O_8^{2-} + pH (10,5 - 12) \rightarrow 2 SO_4^{\cdot -}$

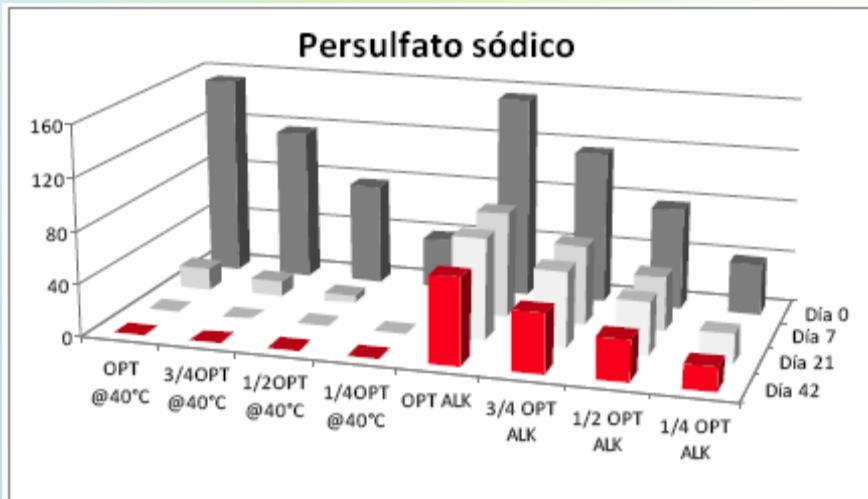
Oxidación Química In Situ, ISCO (In Situ Chemical Oxidation)

* ENSAYOS EN VÍA HÚMEDA

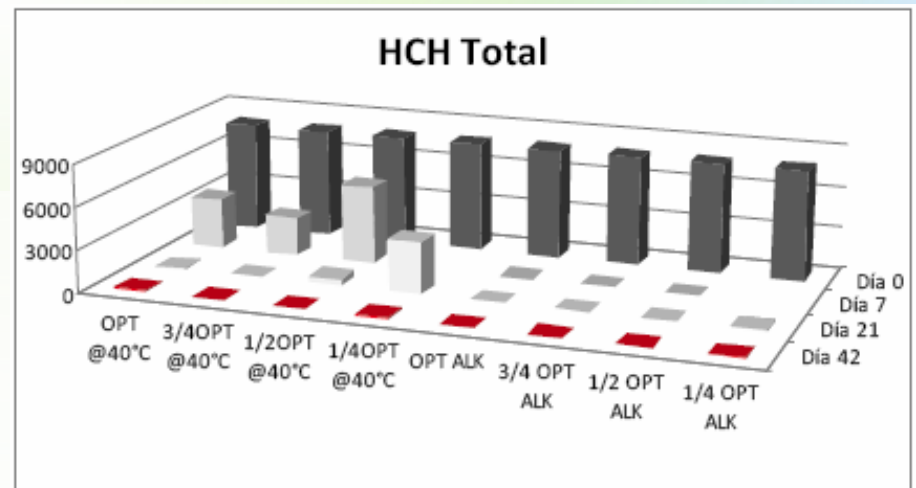
- Métodos de activación seleccionados
- Activación térmica ($T^a = 40\text{ }^\circ\text{C}$)
- Activación alcalina ($\text{pH}=10 - 12$)

- Dosis de persulfato
Dosis óptima (OPT); 155 g/l
75% de la dosis óptima ($\frac{3}{4}$ OPT)
50% de la dosis óptima ($\frac{1}{2}$ OPT)
25% de la dosis óptima ($\frac{1}{4}$ OPT)

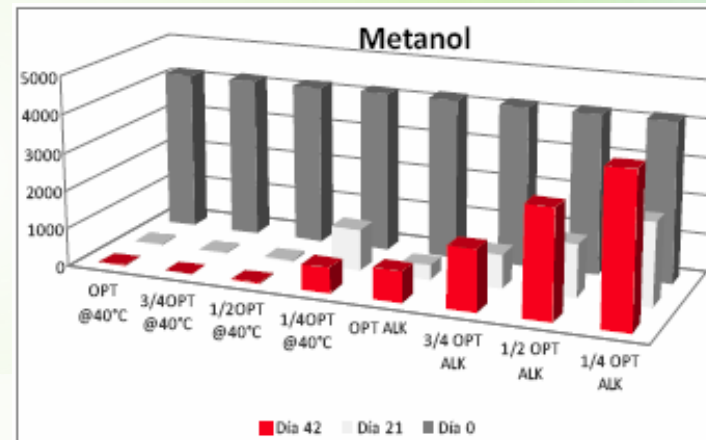
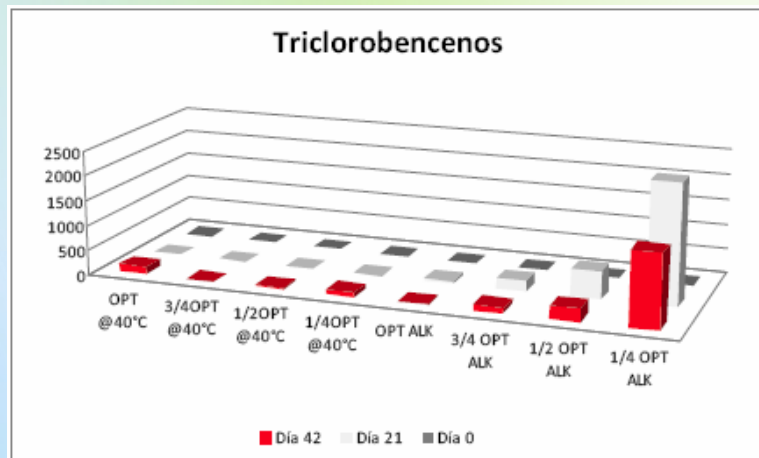
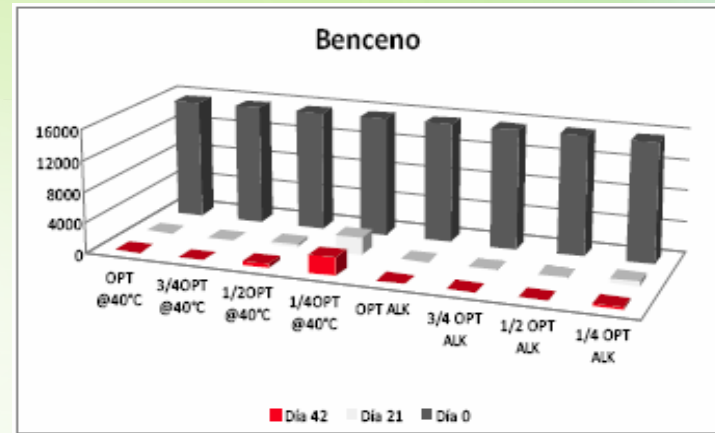
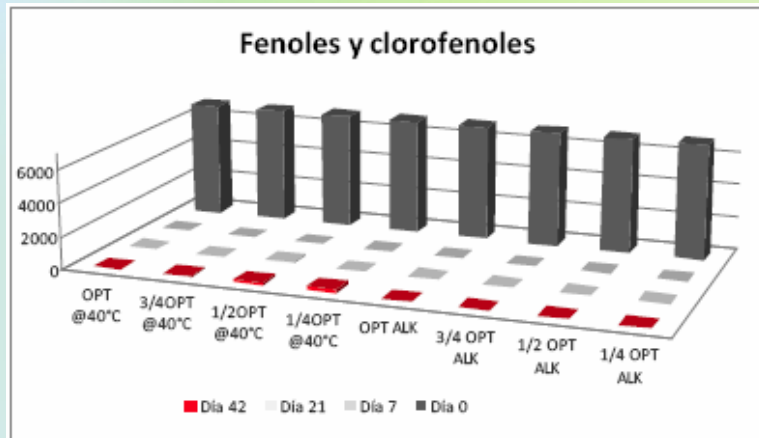
Evolución concentraciones de persulfato (g/l)



Evolución concentraciones de HCH ($\mu\text{g/l}$)



Oxidación Química In Situ, ISCO (In Situ Chemical Oxidation)



DEL LABORATORIO AL CAMPO

ENSAYOS PILOTO:

- EXTRACCIÓN DE VAPORES: Air Sparging y Extracción de Vapores (AS/SVE), In Well Air Stripping (IWAS)
Directos: Buenos rendimientos para COV, bajos para HCH
Previa hidrólisis alcalina: pendiente. prometedor
- SURFACTANTES-MOBILIZACIÓN: no concluyente en medio fracturado y en vertedero. Evidente en medio granular
- SURFACTANTES-COSOLVENTES: Bajos incrementos de eliminación en medio fracturado. Grandes incrementos en vertedero y en medio granular
- DESORCIÓN TÉRMICA IN SITU: planteado y descartado por coste económico y ambiental
- ISCO. Piloto LIFE+ DISCOVERED
- SISCO. Colaboración con Caresoil (Complutense y Politecnica de Madrid). LIFE+ SURFING

DISCOVERED (LIFE 2012)

PROYECTO DEMOSTRATIVO

“DISCOVERED”: Lab to Field, soil remediation demonstrative project. New ISCO application to DNAPL multicomponent environmental problem.

Objetivo:

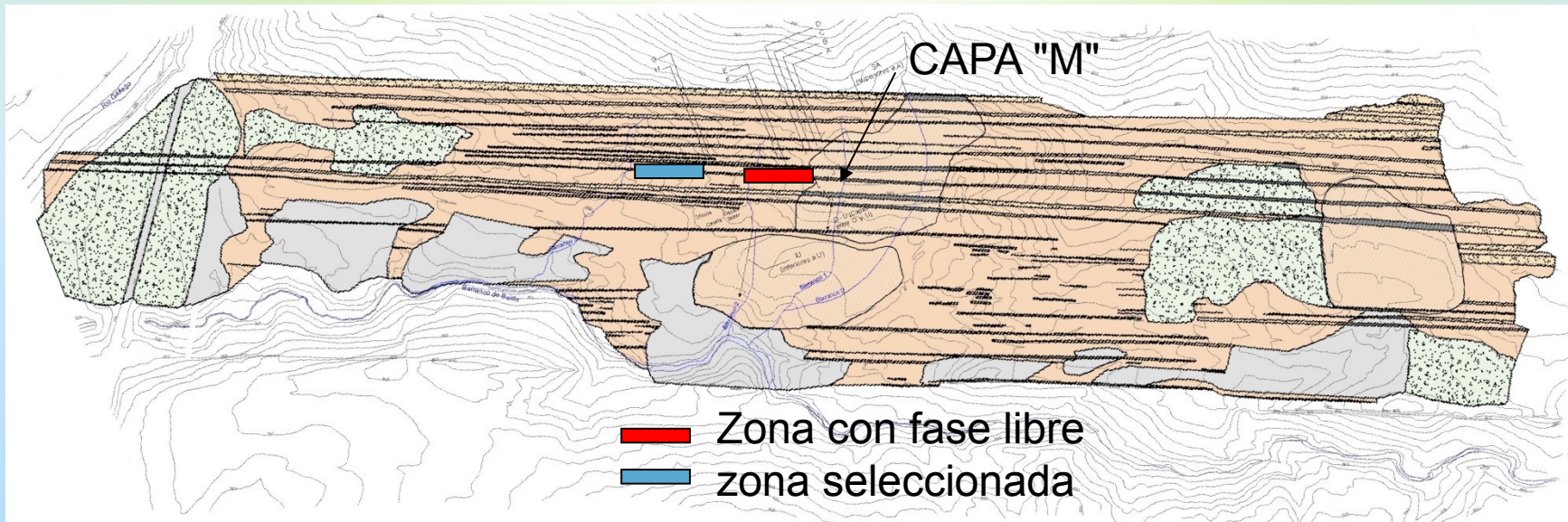
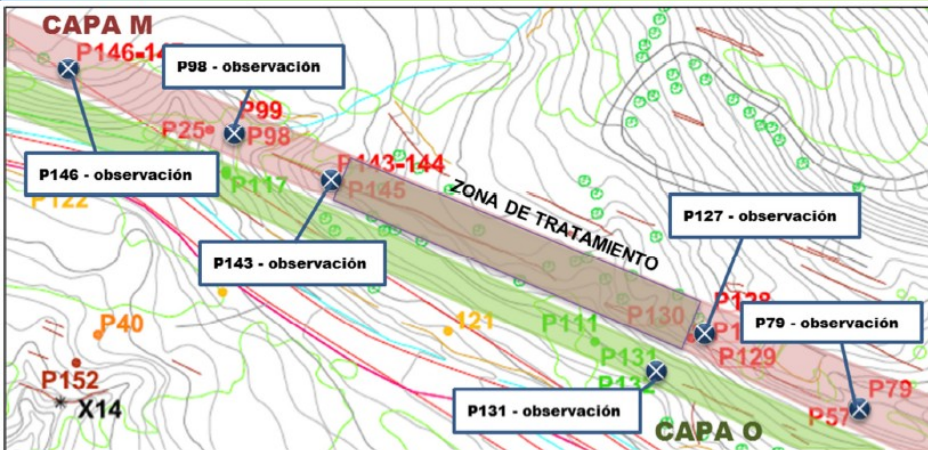
Organización y Gestión en Aragón (Sabiñánigo) de un proyecto de demostración de la viabilidad técnica para Oxidación Química de un emplazamiento contaminado por mezcla de pesticidas densos y volátiles (HCH y otros Compuestos orgánicos persistentes, COPs)

DISCOVERED

1.-diseño del ensayo

SELECCIÓN DE LA ZONA:

- Capa sin DNAPL o con presencia residual.
- Facilidad de acceso
- Buen conocimiento del funcionamiento hidrogeológico
- Buen control aguas abajo. Sondeos existentes



DISCOVERED

¿QUE HAY QUE CONOCER?

- PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS BÁSICOS: PERMEABILIDAD, TRANSMISIVIDAD, ALMACENAMIENTO, NIVEL FREÁTICO.
- DONDE ESTÁN LAS FRACTURAS Y QUE CONEXIÓN TIENEN
- CARACTERÍSTICAS DE LOS CONTAMINANTES Y DEL AGUA SUBTERRÁNEA
- POR DONDE SE MUEVE, CUANTO Y A QUE VELOCIDAD

DISCOVERED

INVESTIGACIÓN PREVIA:

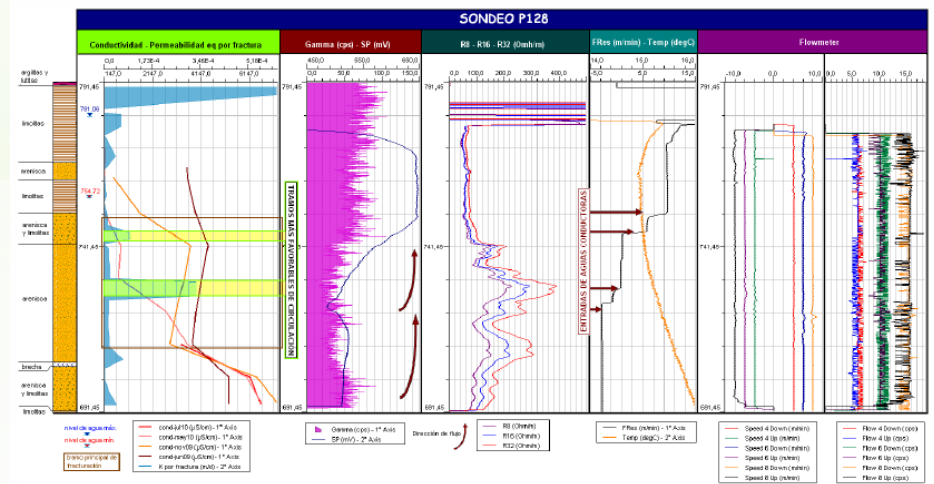
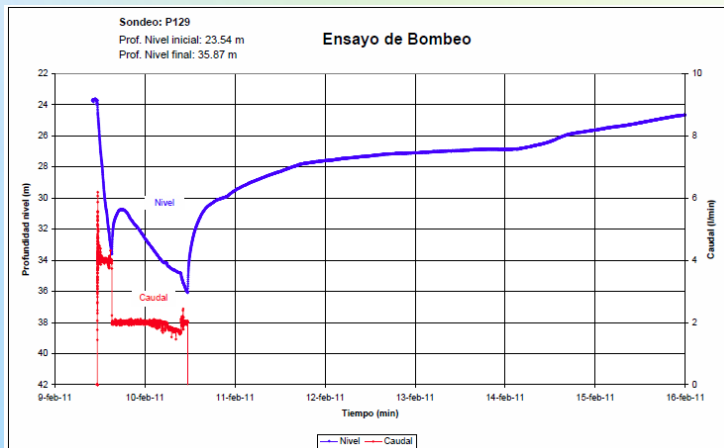
SONDEOS: TESTIFICACIÓN, ENSAYOS LUGEON EN AVANCE

EVOLUCIÓN DE NIVELES: SONDAS, DIVER, PLUVIOMETRÍA

EVOLUCIÓN QUÍMICA: PERFILES FISICOQUÍMICOS, MUESTREOS Y ANALÍTICAS

ENSAYOS: INYECCIÓN-BOMBEO-RECUPERACIÓN, INTERFERENCIA A BAJO CAUDAL, LOGs, FLOWMETER, TRAZADORES

BALANCE DE MASAS: MUESTREADORES PASIVOS DE FLUJO



DISCOVERED

FRANJA DE CIRCULACIÓN PREFERENTE

Figura nº 5: Distribución de los datos analizados (capa M)

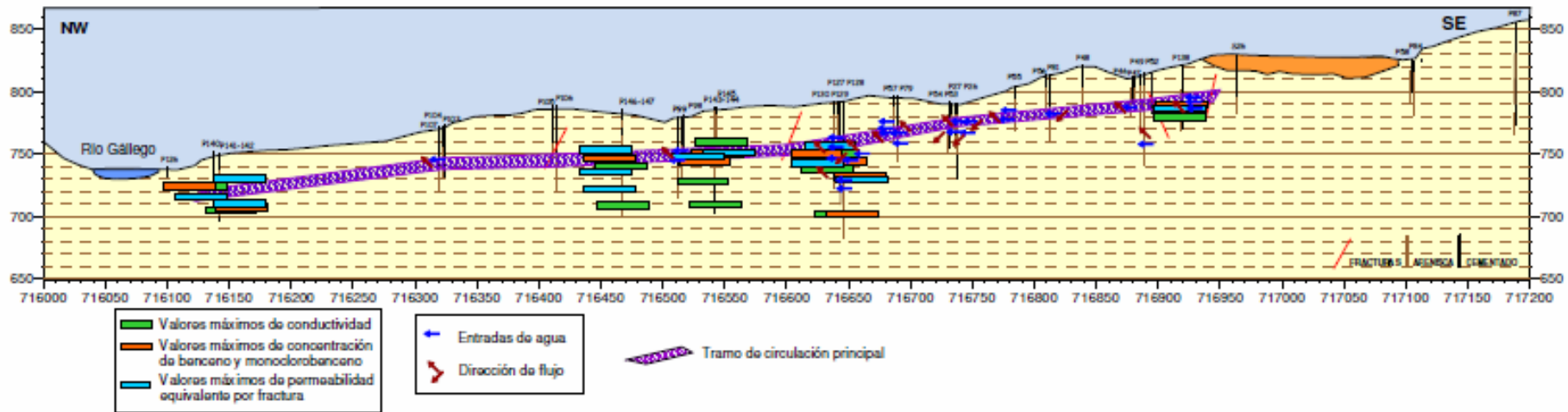
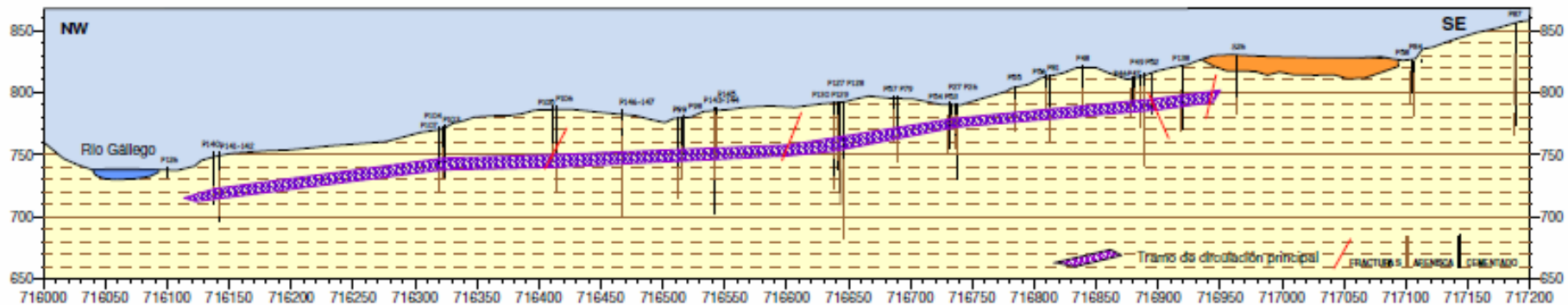


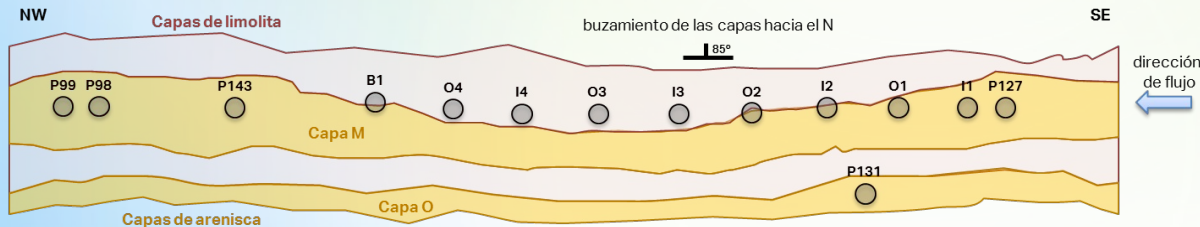
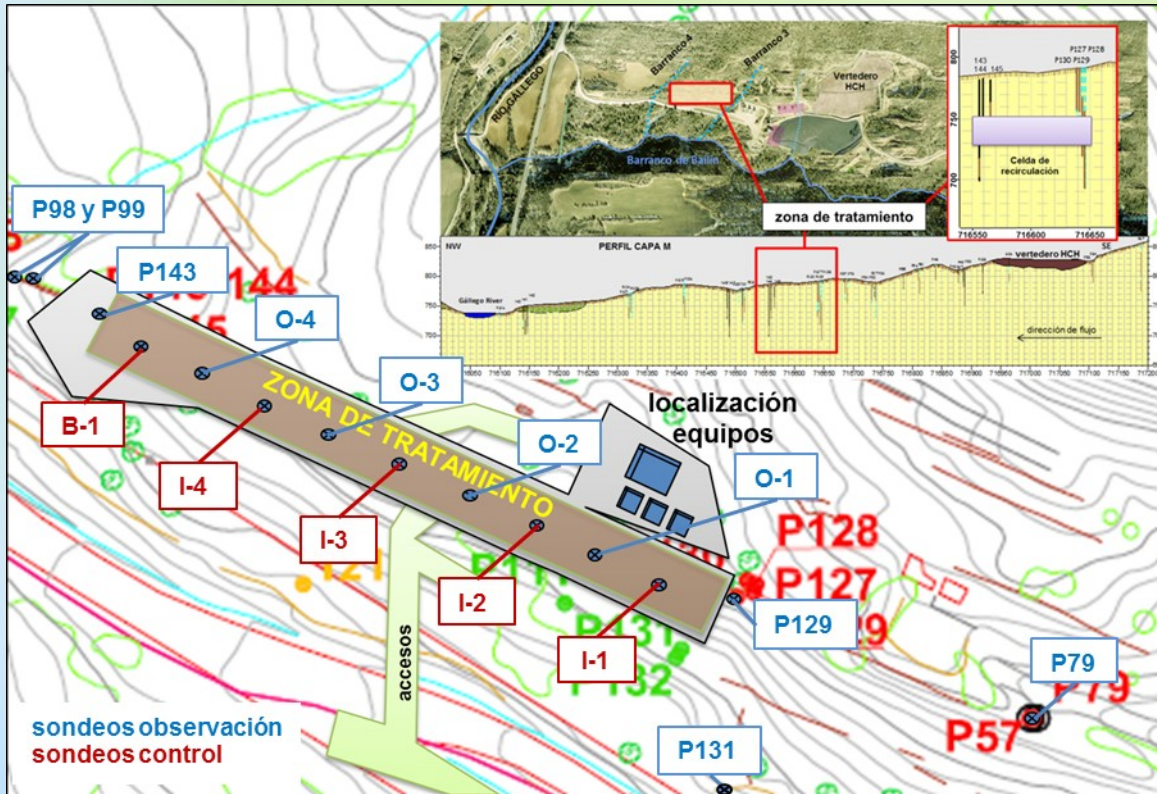
Figura nº 6: Vías preferentes de circulación a través de la fracturación (capa M)



DISCOVERED

CELDA DE ENSAYO:

- Nuevos sondeos: 4 inyección, 4 control, 1 bombeo. separación entre sondeos 12,5 m. Profundidad 45 m.
- Sondeos existentes aguas arriba y aguas abajo para control
- Capa M: anchura 4 m, profundidad actuación entre 25-45 m



DISCOVERED

ENSAYOS PREVIOS

OBJETIVOS:

- COMPROBAR FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO EN LA CELDA
- CONECTIVIDAD ENTRE SONDEOS
- CAUDAL DE INYECCIÓN ADMISIBLE
- CAUDAL DE BOMBEO
- TIEMPO DE TRÁNSITO
- ESTADO QUÍMICO

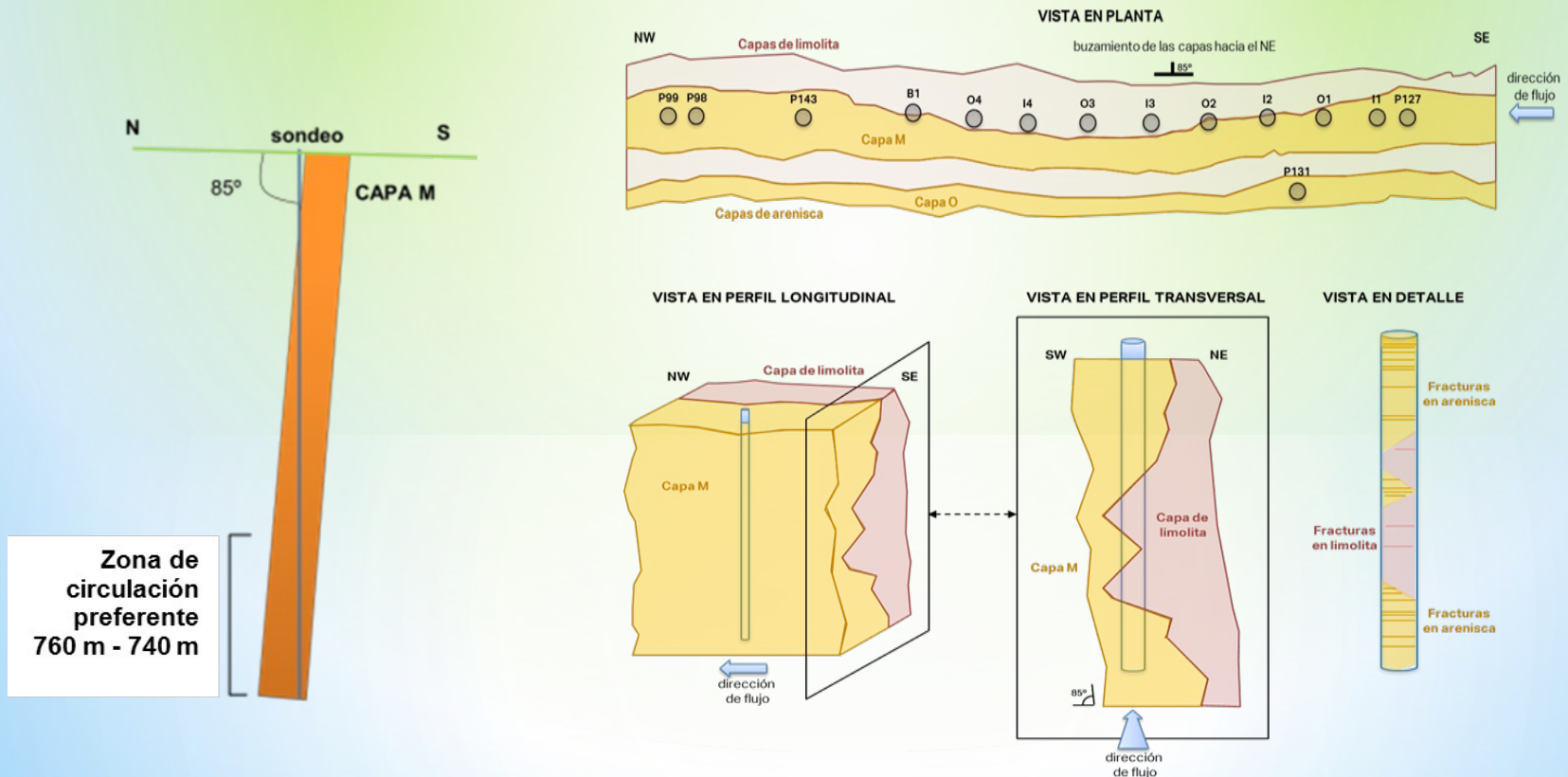
MÉTODOS:

- ENSAYOS DE INYECCIÓN Y BOMBEO
- TRAZADORES
- ANALÍTICAS Y CONTROL DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS

DISCOVERED

ENSAYOS DE INYECCIÓN Y BOMBEO: CONCLUSIONES

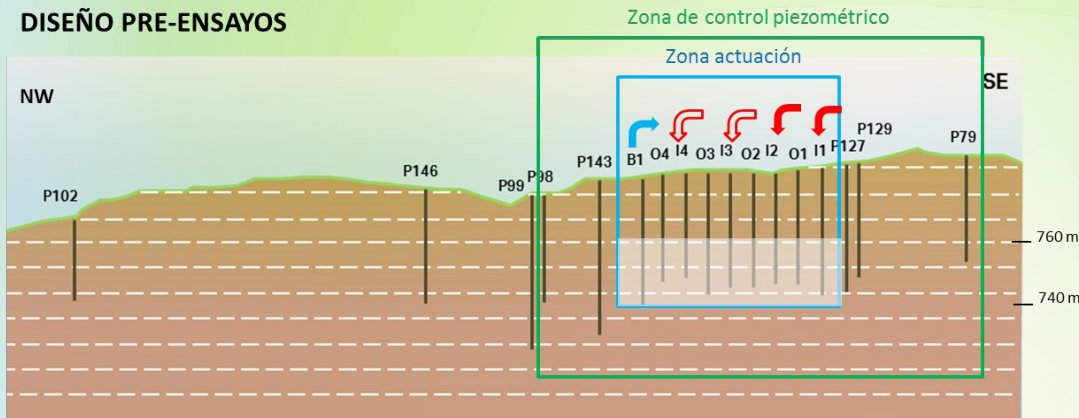
- IDENTIFICACIÓN DE SONDEOS BIEN Y MAL COMUNICADOS
- CAUDAL DE INYECCIÓN PARA NO SOBREELEVAR FREÁTICO
- CAUDAL DE BOMBEO PARA NO DEPRIMIR EN EXCESO
- EL AGUA INYECTADA SE USA COMO TRAZADOR MIDIENDO CONDUCTIVIDAD A DISTINTOS TIEMPOS Y PROFUNDIDADES. LOCALIZACIÓN DE VÍAS PREFERENTES Y TIEMPOS DE TRÁNSITO



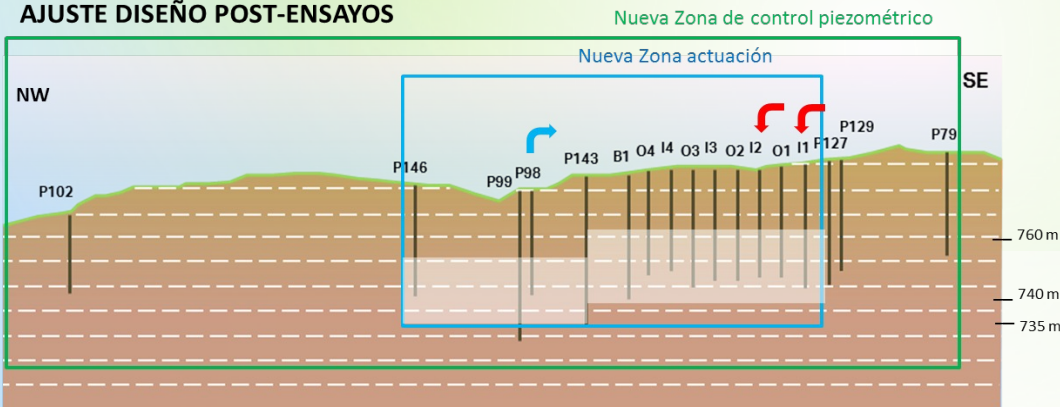
DISCOVERED

REPLANTEO DE LA CELDA Y ENSAYO

DISEÑO PRE-ENSAYOS

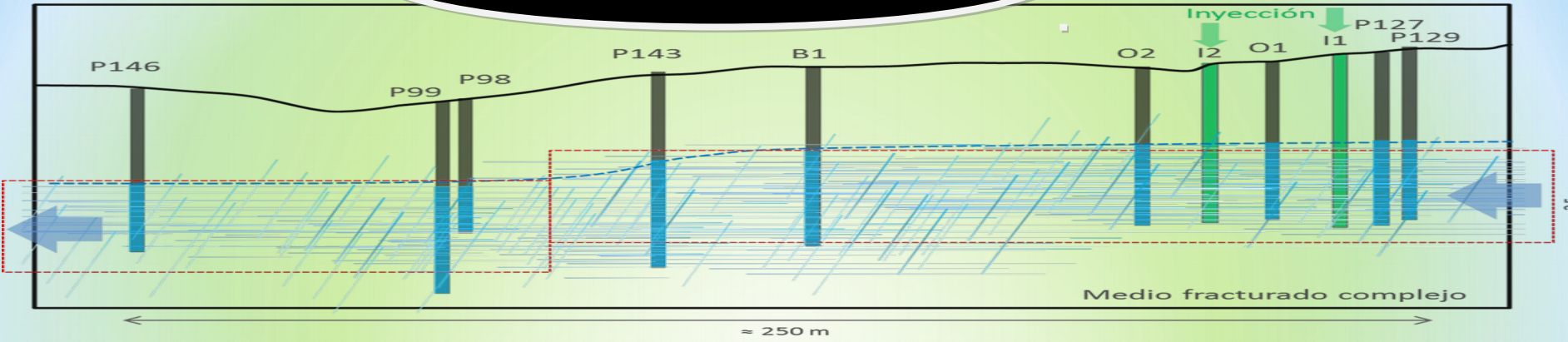


AJUSTE DISEÑO POST-ENSAYOS



Sond eo	Capa	Litología	Función
I-1	M	Arenisca	Inyección
I-2	M	Arenisca	Inyección
P79	M	Arenisca	Monitorización
P129	M	Arenisca	Monitorización
P131	O	Arenisca	Monitorización
O-1	M	Arenisca	Monitorización
O-2	M	Arenisca	Monitorización
O-3	Base ~ M	Limolita	Monitorización
O-4	Base ~ M	Limolita	Monitorización
B-1	Transición	Transición	Monitorización
P143	M	Arenisca	Monitorización
P98	M	Arenisca	Bombeo
P99	M	Arenisca	Monitorización
P146	M	Arenisca	Monitorización

DISCOVERED

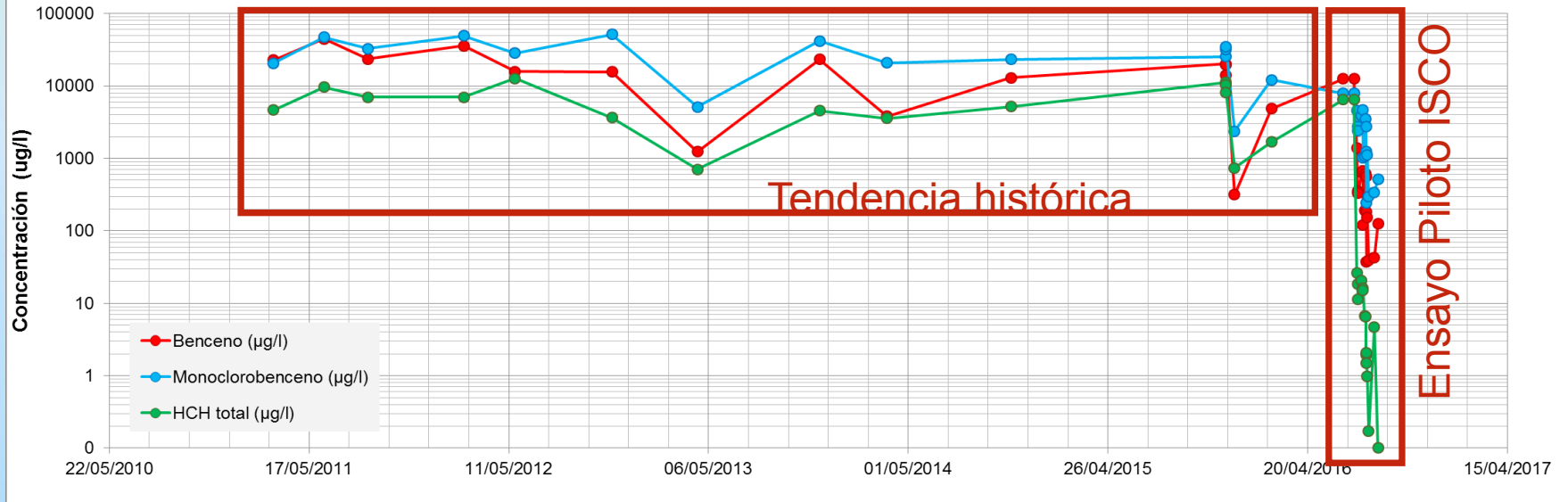


Evolución Histórica Concentraciones P127

Evolución Histórica Concentraciones O2

Evolución Histórica Concentraciones P143

Evolución Histórica Concentraciones P98

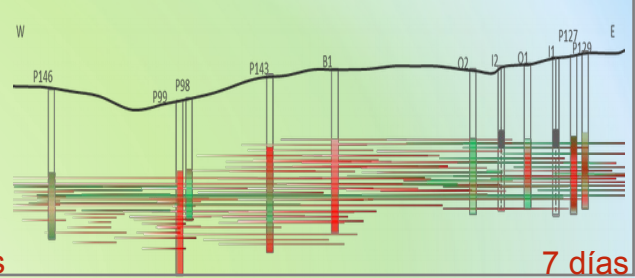
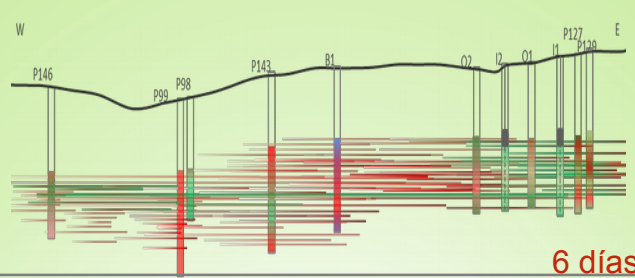
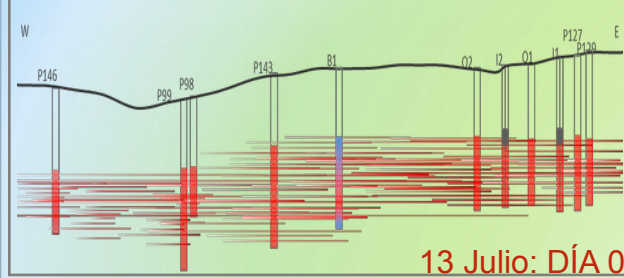


Evolución ensayo Piloto ISCO

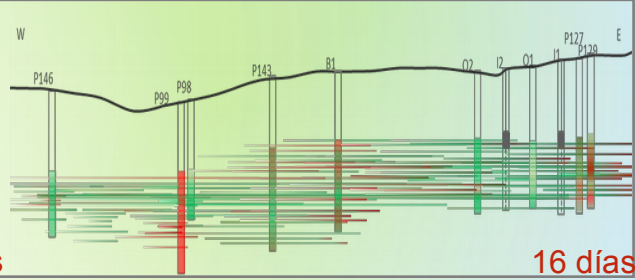
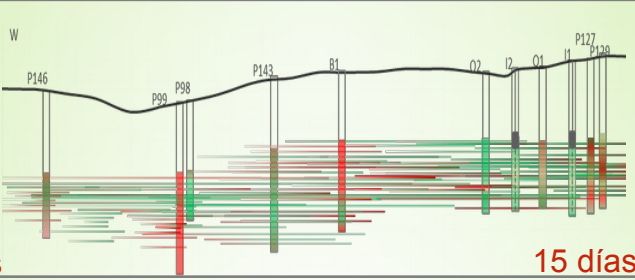
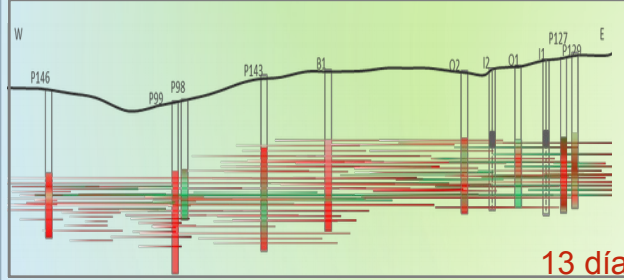
DISCOVERED

Condiciones iniciales del ensayo

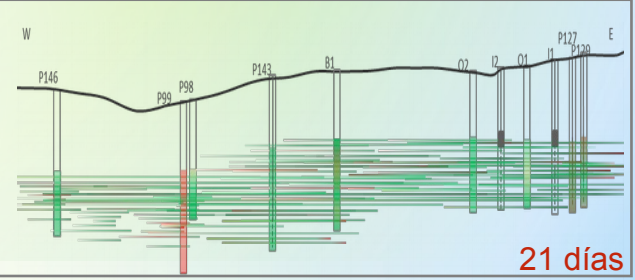
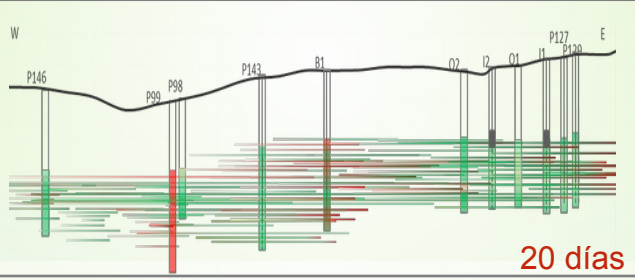
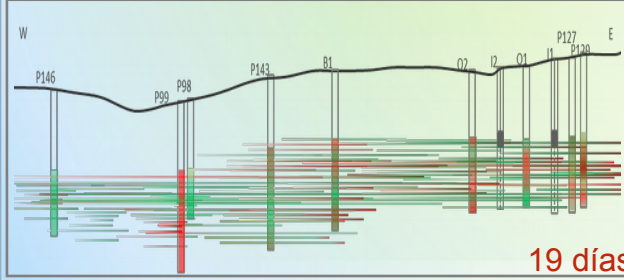
1 evento inyección oxidante



2 evento inyección oxidante

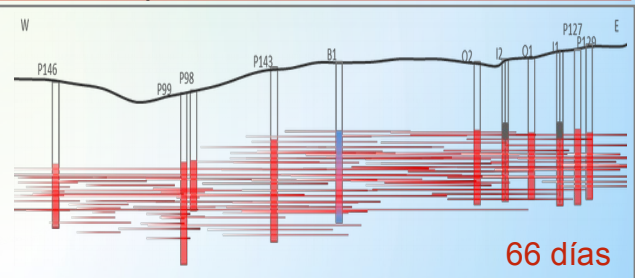
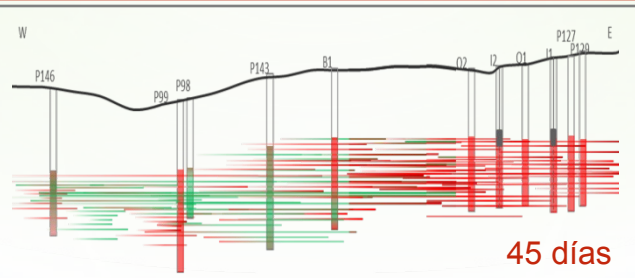
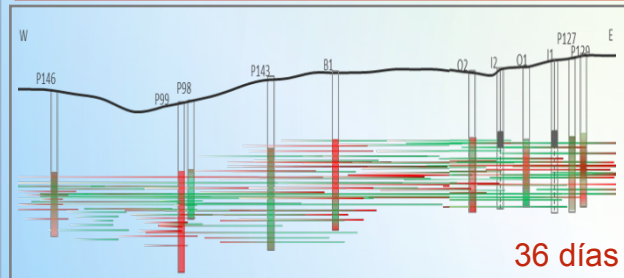


3 evento inyección oxidante



Seguimiento post-inyecciones

Recuperación condiciones iniciales



CAMINO ACTUAL

“A PRIORI” NINGUNA TÉCNICA ES DESCARTABLE
PERO PRIORIZAMOS

- MINIMIZAR EL RIESGO
- SENCILLEZ
- GESTIÓN INTERNA DE RESIDUOS
- MINIMIZAR COSTES

PROYECTOS EN MARCHA:

DGA-Emgrisa-GrupoCaresoil (Univ Complutense y Politécnica):

- Surfactantes en medio granular
- Recuperación de surfactantes y oxidación on site

DGA-SARGA-IHPA-Improquimia(Univ Compl)-Univ Stuttgart:

LIFE+ SURFING: Ensayo piloto en medio fracturado de SISCO

DGA-SARGA-IPE(CSIC)-Univ Santiago: convenio CAIXA

Desarrollo de bacterias autóctonas en biorremediación

DGA-Emgrisa-Univ Castilla-LaMancha

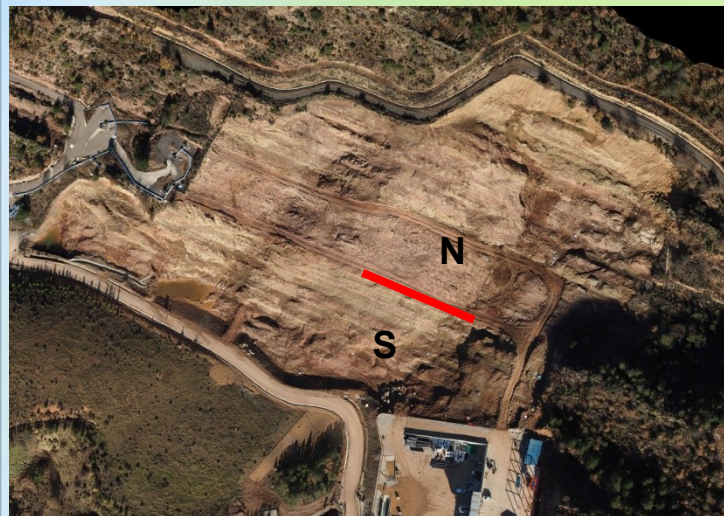
Electroestabilización de lodos con HCH

LIFE SURFING

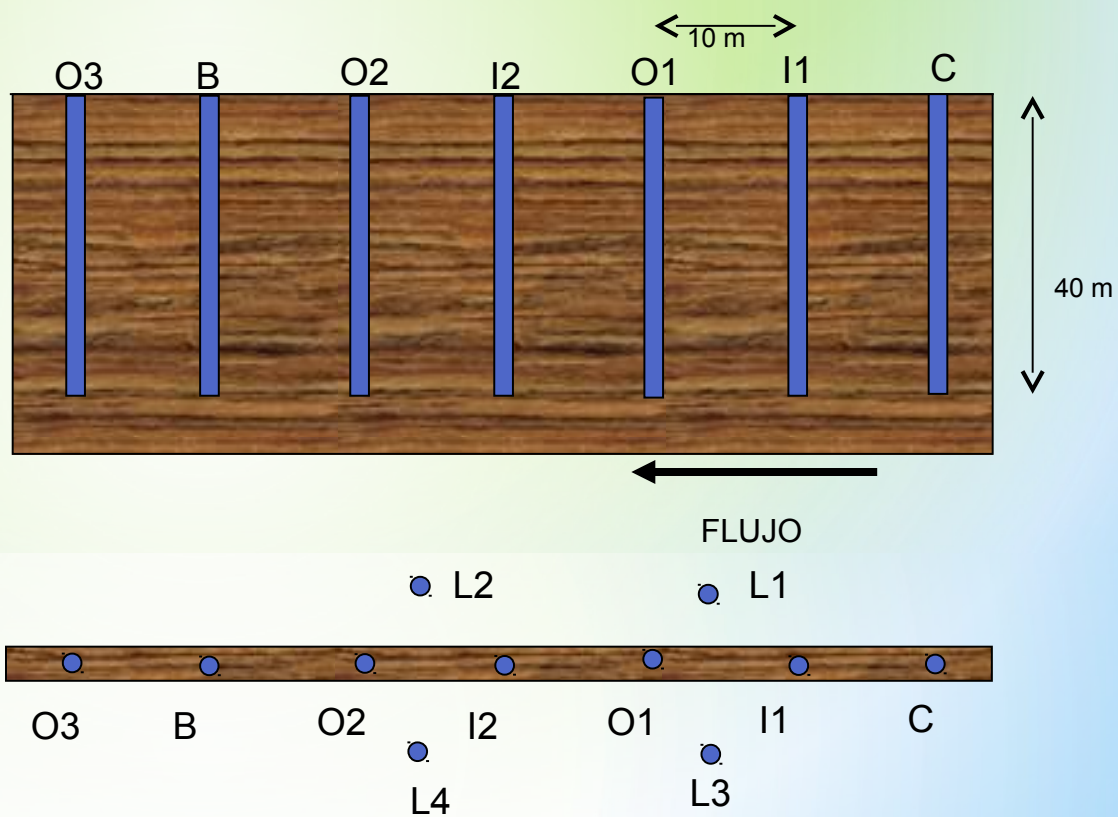
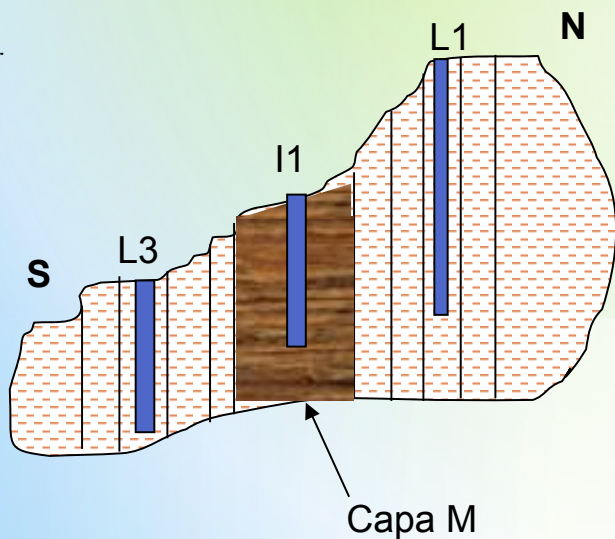
PROYECTO PILOTO DE ELIMINACIÓN DE FASE DENSA RESIDUAL EN MEDIOS FRACTURADOS MEDIANTE LA COMBINACIÓN DE SURFACTANTES Y OXIDANTES

- TRABAJOS PRELIMINARES: SONDEOS, AGOTAMIENTO DNAPL BOMBEABLE. TRAZADORES
- PRIMERA FASE: SEAR, OXIDACIÓN ON SITE
- SEGUNDA FASE: SISCO
- TERCERA FASE: SEGUIMIENTO-ISCO

LIFE SURFING

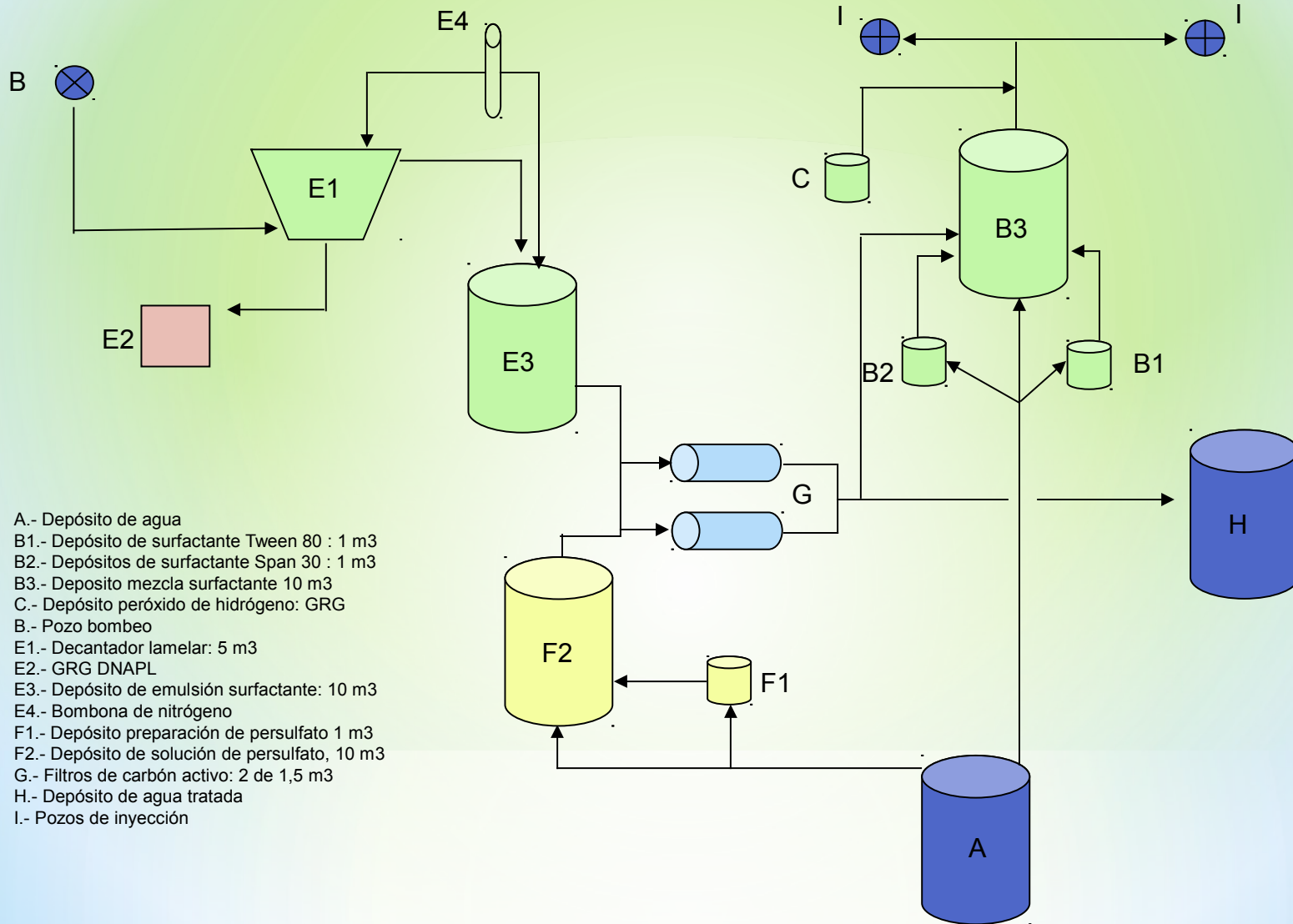


- C: control aguas arriba
- I: sondeos de inyección
- O: sondeos de observación en capa M
- B: bombeo
- L: Sondeos de observación fuera de capa



1ª FASE. SEAR

LIFE SURFING

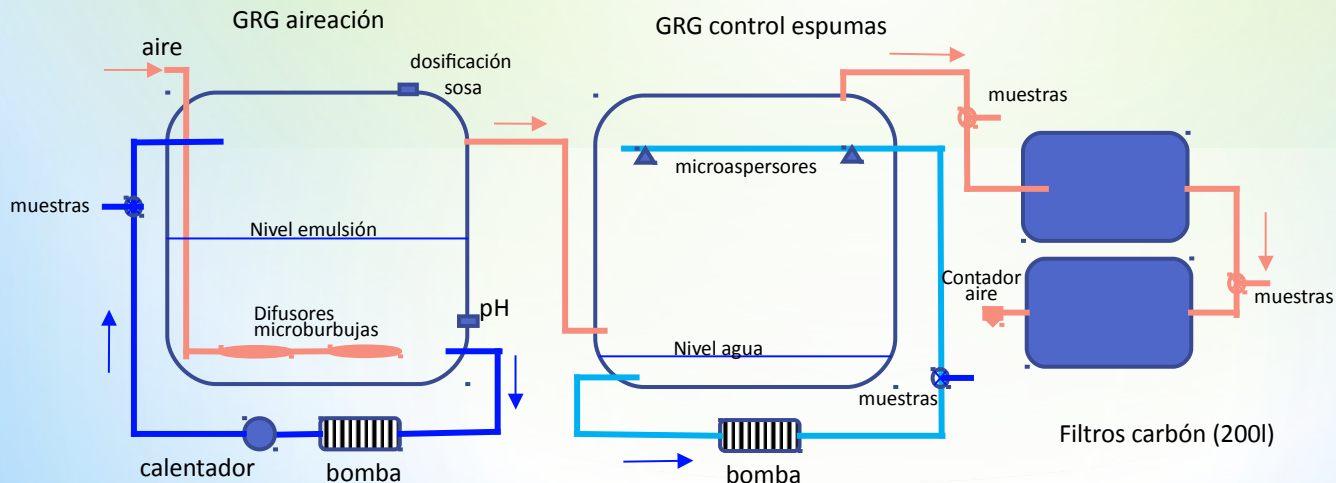
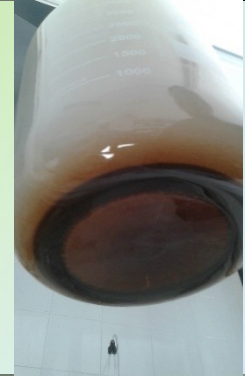


- A.- Depósito de agua
- B1.- Depósito de surfactante Tween 80 : 1 m3
- B2.- Depósitos de surfactante Span 30 : 1 m3
- B3.- Depósito mezcla surfactante 10 m3
- C.- Depósito peróxido de hidrógeno: GRG
- B.- Pozo bombeo
- E1.- Decantador lamelar: 5 m3
- E2.- GRG DNAPL
- E3.- Depósito de emulsión surfactante: 10 m3
- E4.- Bombona de nitrógeno
- F1.- Depósito preparación de persulfato 1 m3
- F2.- Depósito de solución de persulfato, 10 m3
- G.- Filtros de carbón activo: 2 de 1,5 m3
- H.- Depósito de agua tratada
- I.- Pozos de inyección

LIFE SURFING

PROYECTO VIVO:

- SELECCIÓN DE SURFACTANTE: de Tween-Span a Emulse®
- Tratamiento on site: varias opciones
 - Desemulsionado, separación de fases
 - Recuperación surfactante-retención COP en absorbentes
 - Fenton, recuperación de surfactante
 - Aireación-retención vapores-recuperación surfactante
 - Hidrólisis alcalina-Aireación-retención vapores-recuperación surfactante
 - Oxidación sobre carbón activo y absorbentes



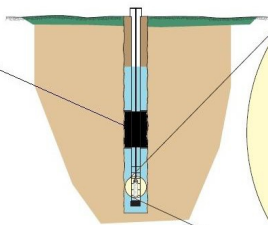
EL FUTURO: QUE TRABAJE LA VIDA

DOS MATRICES, DOS ENFOQUES INTERCAMBIABLES: ACUÍFERO DE BAILIN: herramientas moleculares

Muestreo microbiológico

Los muestreadores Bio-Traps se basan en un método de muestreo pasivo que permite evaluar los resultados a lo largo del tiempo en vez de en un único evento

Para mantener los tramos de muestreo aislados en la zona de flujo principal, se pueden instalar obturadores neumáticos



Los muestreadores son suspendidos en el tramo ranurado durante un periodo de entre 30 y 45 días, dependiendo de los objetivos

Bio-Trap



¿Hay presentes microorganismos degradadores de los contaminantes, y si es así, cuántos hay?

Reacción en Cadena de la Polimerasa cuantitativa (qPCR)

¿Se está produciendo biodegradación de los contaminantes?

Estudio de Isótopos Estables (SIP)

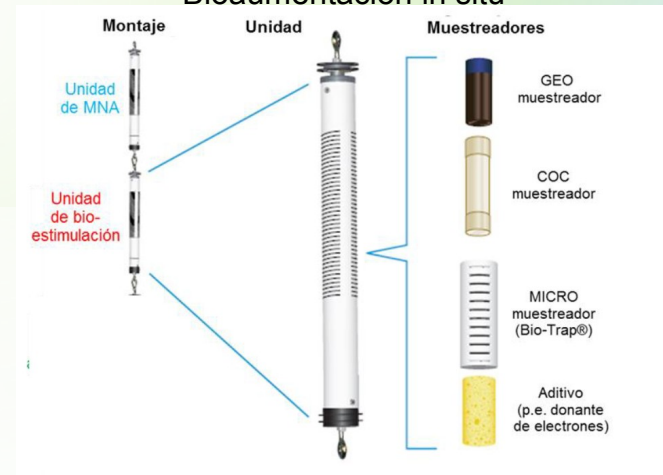
Análisis específico de Isótopos de un Compuesto (CSIA)

¿Qué microorganismos están presentes?

Metagenómica (Secuenciación de siguiente Generación, NGS)

Chip de ADN (Microarray)

Bioaumentación in situ



CONCLUSIONES

- ✓ **FACTORES DETERMINANTES:** grandes volúmenes de residuos, diferentes matrices (contaminantes puros, suelo, roca, zona vadosa y acuíferos), presencia de DNAPL
- ✓ **CONSECUENCIA:** implementación de una estrategia de descontaminación a largo plazo.
- ✓ **FACTORES LIMITANTES:** los riesgos para la salud y el medio ambiente. Disponibilidad económica.

- **PRIORIDADES:** El hecho de que el DNAPL ha llegado a las aguas subterráneas requiere concentrar los esfuerzos en primer lugar para contener su avance y en segundo lugar para eliminar las fuentes primarias y secundarias de estos compuestos.
- **ACERCA DE LOS RESIDUOS:** La eliminación final de los grandes volúmenes de residuos se pospone hasta que se disponga de técnicas adecuadas a costos accesibles. Mientras tanto, los esfuerzos se centran en el aislamiento de estos residuos para prevenir la generación de lixiviados que podrían llegar a aguas subterráneas y superficiales.
- **SOBRE LAS TÉCNICAS DE DESCONTAMINACIÓN:** combinación de más de una técnica de tratamiento. Pump and treat, surfactantes, tratamientos físico-químicos, bioaumentación. Las pruebas de laboratorio y los ensayos piloto debe comenzar mucho antes del momento en el que se pueden aplicar a gran escala, aproximadamente 5 años antes de su aplicación a gran escala.

NUEVAS TENDENCIAS EN LA RESTAURACIÓN DE SUELOS DEGRADADOS III:
METALES, CONTAMINANTES ORGÁNICOS Y HUMEDALES ARTIFICIALES
NEW TRENDS IN RESTORATION OF DEGRADED SOILS III: TRACE ELEMENTS, ORGANIC POLLUTANTS AND
CONSTRUCTED WETLANDS

**“ RESIDUOS DE LINDANO EN ARAGÓN.
LINDANO Y AGUA”.**
“THE LINDANE CASE IN ARAGON. LINDANE AND WATER”

GRACIAS POR VUESTRA ATENCIÓN

Fernández, J, *Unidad Lindano, Dirección General de Sostenibilidad, Departamento de Desarrollo Rural
Y Sostenibilidad, Gobierno de Aragón*
jfernandezc@aragon.es

