

INVESTIGACIÓN Y CONFINAMIENTO DE SUELOS CONTAMINADOS POR HEXACLOROCICLOHEXANO EN EL POLÍGONO DE TORNEIROS –O PORRIÑO- (PONTEVEDRA)

Autores.- VARELA-CASTEJÓN Calixto; MARTÍNEZ LOZANO Francisco; BLASCO HERGUEDAS, Oscar

Eptisa, Servicios de Ingeniería, S.A. Rúa Pablo Iglesias nº2, Bajo. 15174 Vilaboa, Culleredo (A Coruña)

Resumen: En el entorno de un polígono de viviendas en O Porriño (Pontevedra, NO-España) se detectó la presencia de una zona en la que se vertieron residuos de la producción de lindano. Entre los años 1998 y 2000 se llevaron a cabo investigaciones sobre la presencia de contaminación en suelos y aguas subterráneas que permitieron delimitar las zonas más afectadas por diferentes isómeros del hexaclorociclohexano (HCH).

El análisis de riesgos para la salud humana llevado a cabo indicó la presencia de niveles de riesgo inaceptables que hacían necesaria una actuación que interrumpiera las vías de exposición a la contaminación. Después de barajar diversas alternativas se llegó a la conclusión que la más adecuada, en aquel momento, era el confinamiento de los suelos en una celda de seguridad construida *in situ*.

Para la definición del proyecto, se efectuaron diversos modelados numéricos del comportamiento de las aguas subterráneas y de la contaminación como técnica de apoyo a la toma de decisiones sobre el diseño de la celda de seguridad.

El confinamiento fue finalmente ejecutado mediante la construcción de pantallas de cemento bentonita hasta una profundidad máxima de 30 metros (para anclarlas en el sustrato impermeable) y un sellado superficial multicapas compuesto de superficie a fondo por: tierra vegetal, jabre, geocompuesto drenante, geocompuesto de bentonita y geotextil.

Palabras Clave: Lindano, HCH, acuífero, suelos contaminados, Torneiros, ModFlow, MT3D, celda de seguridad, modelado numérico

Abstract: In a residential area in O Porriño (Pontevedra, Spain-NO) was detected the presence of an area where waste from the production of lindane was dumped. Between 1998 and 2000, a research on the presence of contamination in soil and groundwater allowed the identification of the most affected areas by various isomers of hexachlorocyclohexane (HCH).

The human health risks analysis conducted indicated the presence of unacceptable levels of risk, so it was necessary an action to interrupt the routes of exposure to pollution. After shuffling diverse alternatives it was concluded that the most appropriate at that time was the placement of the soil in a security cell constructed *in situ*.

For the definition of the project, diverse numerical models of the behavior of groundwater and contamination were developed as a technical support to decision making about the design of the security cell.

The confinement was finally executed by the construction of cement-bentonite panels up to a maximum depth of 30 meters (to embed them into the impermeable substrate) and a multilayer surface sealing composite from surface to depth: topsoil, soil, drainage geocomposite, bentonite geocomposite and geotextile.

Keywords: Lindane, HCH, aquifer, soil contamination, Torneiros, ModFlow, MT3D, security cell, numeric model

INTRODUCCIÓN

En el entorno del Polígono de Viviendas de Torneiros y Circuito de Cicloturismo de O Porriño (referido en las investigaciones realizadas como zona PV-1) se depositaron, a lo largo de los años 50 y 60 del siglo XX, la mayor parte de los residuos procedentes de una antigua factoría de producción de lindano (γ -HCH) (Crespo *et al.*, 2001). La zona de vertido se corresponde con una antigua zona de extracción de áridos, de propiedad municipal, cedida en concesión a la factoría, que relleno con sus vertidos las pozas dejadas por las extracciones. En las fotografías aéreas anteriores a la edificación de las viviendas, se observa la zona excavada, con cubetas rellenas de agua que constituyeron el principal punto de vertido.

Se resumen en este artículo las labores de investigación y confinamiento de suelos contaminados llevadas a cabo en este emplazamiento entre los años 1999 y 2001 descritas con detalle en diversos informes y proyectos, realizados por la empresa Eptisa para la Dirección Xeral de Calidade e Avaliación Ambiental de la Consellería de Medio Ambiente de la Xunta de Galicia (Eptisa, 1999a; Xunta 1999).

I. SITUACIÓN PREVIA DE LA ZONA INVESTIGADA

El Polígono de Torneiros es un enclave donde coexisten algunas industrias farmacéuticas y de productos del hogar con viviendas sociales, casas unifamiliares antiguas, centros escolares y áreas de esparcimiento, entre las que destaca un Circuito Municipal de Cicloturistas.

La investigación a la que hace referencia el presente artículo, se centró en una superficie de 160.000 m² que engloba la antigua concesión municipal donde se realizaron los vertidos y su entorno. Puede subdividirse en dos zonas separadas por un escarpe o talud de

aproximadamente 3,0 m de altura, que define una plataforma superior constituida por rellenos antrópicos y vertidos de HCH (Zona 1), y otra más deprimida constituida por una serie de fincas privadas con abundante cobertera vegetal, que en principio no parece haber sido sometida a vertidos (Zona 2). Aproximadamente a 200 m del límite oriental de la zona investigada discurre el río Louro en dirección norte-sur. (Fig. 1)

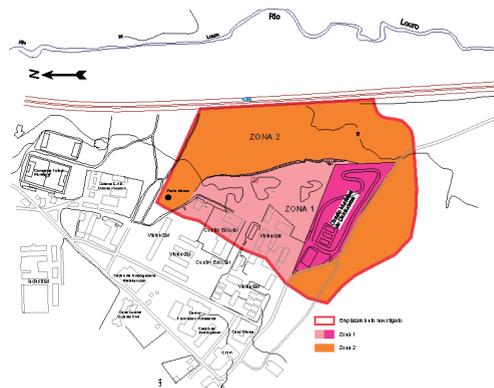


Fig. 1: Delimitación del emplazamiento y subzonas indicadas en el texto

II. ESTUDIO DEL MEDIO

La zona investigada se enclava sobre una cuenca pliocuaternaria (posiblemente miocena en su mayor parte), cuya evolución está fuertemente condicionada por la existencia de una gran falla que se prolonga desde Malpica, a lo largo del valle del río Louro, hasta Portugal (Crespo *et al.*, 2000). Esta falla, de dirección aproximada norte-sur, se formó durante la Orogenia Hercínica, y posteriormente en el Terciario rejugó como normal provocando la aparición de una fosa que se relleno de sedimentos detríticos miocenos y cuaternarios.

Durante el Pleistoceno el río Louro depositó sus sedimentos hasta la colmatación

de la cubeta tectónica, cuyo máximo espesor de sedimentos aparece localizado en la zona investigada, para posteriormente migrar hacia el este y emplazarse en su cauce actual excavado sobre materiales alterados de origen metamórfico y plutónico. En principio, ésta podría ser la explicación de la escasa o nula contaminación de las aguas del río Louro por HCH, ya que no estaría conectado de forma franca con los sedimentos terciarios que rellenan la cuenca.

III. EL ACUÍFERO TERCIARIO DE LA CUENCA DEL RÍO LOURO

El conjunto detrítico que conforma la cuenca del río Louro en el ámbito que abarca el estudio de suelos contaminados en el Polígono de Torneiros, permite diferenciar entre dos tipos de acuíferos, uno superficial o libre, directamente relacionado con los niveles de aterrazamiento del río Louro, y un acuífero profundo semiconfinado, asociado fundamentalmente con los cuerpos detríticos de granulometría tipo arena limosa gruesa a media, de morfología lenticular, que se interdigitan de forma aleatoria con potentes niveles de limos y limos arcillosos de menor permeabilidad.

El fondo de la cuenca viene caracterizado por una superficie de arrasamiento tapizada por un nivel de gravas arcillosas excavado sobre litologías de origen metamórfico (paraneises del Complejo Vigo-Tuy) y emplazamiento graníticos de gran interés comercial en la zona (Granito de Porriño).

El borde de la cuenca terciaria se localiza prácticamente coincidente con los límites de la zona investigada, definiendo, a la vista del mapa de interpretación del fondo de la cuenca, una cubeta de 30 m de profundidad. Esta cubeta se encuentra rellena de depósitos preferentemente limo-arenosos dando lugar al acuífero profundo semiconfinado por los materiales limo-arcillosos, prácticamente impermeables.

La conexión entre este acuífero y el superficial es directa y prácticamente continua en toda la superficie investigada, alimentándose mediante la infiltración de las aguas de lluvia y escorrentía a través del acuífero superficial. Este hecho, añadido a la existencia de depósitos de rellenos antrópicos de más de 3,0 m de espesor en algunas zonas, ha favorecido la contaminación de su lecho hasta profundidades de más de 6,50 m en algunos puntos.

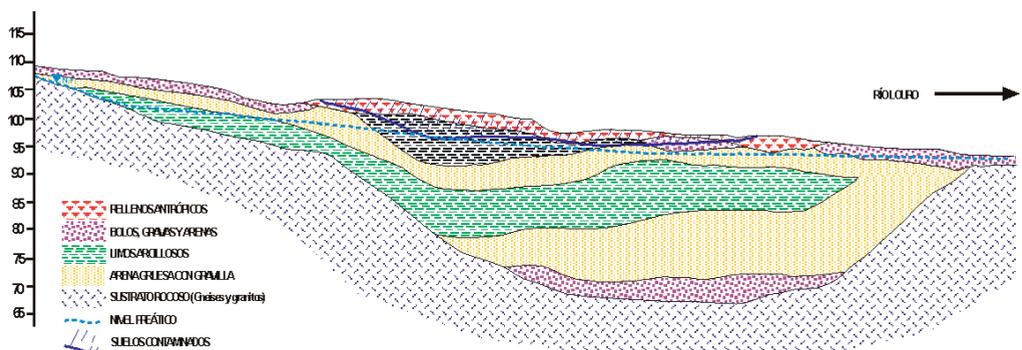


Fig. 2: Perfil geológico. Se indican los niveles contaminados que como se puede apreciar corresponden principalmente con el relleno artificial.

IV. RESULTADOS ANALÍTICOS

Inicialmente sobre 73 muestras de suelo y 5 muestras de agua se realizaron análisis de contenidos en los diferentes isómeros de HCH, con el fin de realizar un balance de la contaminación que permitiese delimitar tanto en superficie como en profundidad el foco contaminante. Igualmente, las aguas analizadas permitieron determinar la capacidad de disolución del contaminante, y su grado de dispersión.

Se comprobó la existencia de una importante contaminación tanto en los suelos como en las aguas. En el momento de la investigación se emplearon como límites de intervención los que aparecían en la legislación holandesa (VROM, 2000) para este tipo de compuestos, tal y como se recomendaba en el “Estudio sobre a actualización do Inventario de Solos Contaminados, xerarquización e desenvolvemento dunha Lexislación para a protección do Solo en Galicia”, de la Consellería de Industria e Comercio de la Xunta de Galicia (Xunta, 1996), así como valores del IHOBE (1998). Estos límites han sido 2 mg/Kg de muestra seca para suelos y 1 µg/l en aguas.

V. CONTAMINACIÓN DE LOS SUELOS

Del análisis de los datos se deduce la existencia de tres zonas dentro del emplazamiento investigado:

- Zona A₁: El terreno afectado por la presencia de HCH ocuparía una superficie de 30.000 m² que se extiende hacia el circuito de cicloturistas y que alcanza una profundidad de hasta 6,50 m. El volumen de suelos afectados se estima en torno a 150.000 m³. A esta superficie habría que incrementar dos áreas puntuales detectadas en otras zonas del emplazamiento.

- Zona A₂: El resto de la superficie ocupada por la plataforma superior del área de investigación, donde se detectan contenidos en HCH pero por debajo del límite establecido como de intervención.
- Zona B: Área ocupada por las fincas privadas y área de arboleda donde se confirma la idea original de la no existencia de vertidos en esta zona.

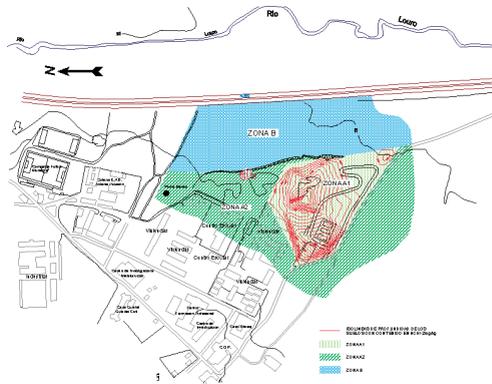


Fig. 3: Delimitación de los focos contaminantes.

VI. CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS

De las analíticas realizadas se desprende que toda la superficie ocupada por el emplazamiento investigado se encuentra afectada por la presencia de contenidos en HCH por encima de 1 µg/l, excepto en una de las muestras analizadas. Los rangos detectados varían desde 0,38 µg/l a 57,42 µg/l.

La existencia de un colchón de residuos constituidos por rellenos de escombros y niveles intercalados de vertidos de HCH, favorecía la percolación de las aguas superficiales de escorrentía y la disolución del residuo lixivándose hacia zonas más

profundas y provocando la contaminación del acuífero.

En la planificación de la campaña de investigación se planteó la instalación de un piezómetro aguas arriba del emplazamiento, más o menos fuera de su área de influencia. Se comprobó en este punto la ausencia de contaminación en los suelos, sin embargo, las aguas presentaban una concentración de 2,54 µg/l de HCH. Una de las principales conclusiones de esta investigación ha sido constatar la existencia de otras fuentes de contaminación además de la originalmente inventariada, sirviendo las aguas subterráneas como indicadores de búsqueda aguas arriba, de focos de residuos o vertidos emisores de la contaminación al acuífero.

VII. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE DESCONTAMINACIÓN

Inicialmente, además de continuar las investigaciones de otros focos contaminantes, la Consellería de Medio Ambiente de la Xunta de Galicia tomó una serie de iniciativas con el fin de evitar el riesgo para la salud humana, ante la constatada existencia de suelos que presentan una importante contaminación por pesticidas, y de un acuífero contaminado en una amplia superficie, donde existen numerosas captaciones particulares mediante pozos.

Ya en 1999, una vez obtenidas las primeras conclusiones de los estudios que se estaban llevando a cabo, se adoptaron las primeras medidas preventivas:

- Clausura de pozos y fuentes públicas, y prohibición de consumo de aguas subterráneas.
- Clausura inmediata del Circuito Municipal de Cicloturistas.
- Análisis e inspecciones de los suelos en las zonas de juego de los cinco centros

educativos existentes en la zona, así como la analítica y control de las aguas de consumo de estos centros.

- Vallado perimetral de toda la superficie afectada por la contaminación en los suelos del Polígono.
- Investigación detallada de áreas potencialmente contaminadas situadas aguas arriba de este emplazamiento.
- Puesta en marcha de la realización de un proyecto de remediación.

Una vez se aisló el emplazamiento en superficie, se plantearon diferentes alternativas de recuperación, recogándose en el siguiente cuadro-resumen el análisis efectuado en su momento:

VIII. ALTERNATIVA ELEGIDA

Dentro del conjunto de propuestas de remediación, la Consellería de Medio Ambiente de la Xunta de Galicia, una vez considerados los pros y contras de cada una de las alternativas, consideró como técnica y económicamente más viable la construcción de una celda de seguridad *in situ*, consistente en la construcción de una pantalla perimetral impermeable, construida con materiales del tipo suelo-bentonita, cemento-bentonita, geomembranas, etc.. Se pretende evitar que el agua subterránea entre en contacto con el foco contaminante, conteniendo la migración de compuestos tóxicos hacia el acuífero. Una vez aislada totalmente la zona contaminada, se procede a una impermeabilización en superficie para evitar la infiltración del agua de lluvia, y a la desviación de las aguas de escorrentía superficial. Se optó por esta alternativa teniendo en cuenta:

Tabla 1. Alternativas de limpieza de suelos consideradas

ALTERNATIVA	CARACTERÍSTICAS	COSTE
Aislamiento en una celda de seguridad <i>in situ</i>	- No es necesario excavar y transportar el suelo - Aísla el suelo del acuífero - Limita y reduce los lixiviados - Solución viable para grandes volúmenes de suelo contaminado - Necesita del dimensionamiento de las pantallas impermeables	1.500.000.000 Pts. (»9.000.000 €)
Aislamiento en una celda de seguridad fuera del emplazamiento	- Se transporta el residuo a una zona más idónea - Necesidad de excavar y transportar el suelo - Traslado del problema a otro emplazamiento - Coste medio - Grandes volúmenes de agua a tratar	2.300.000.000 Pts. (»13.800.000 €)
Vertedero de residuos peligrosos	- Solución permanente - Coste moderado - Necesidad de excavación y transporte el suelo - Gran distancia a la celda de seguridad - Grandes volúmenes de agua a tratar	5.600.000.000 Pts. (»33.700.000 €)
Biodegradación In situ	- Coste medio a bajo - Solución permanente - Necesidad de un análisis previo de viabilidad - Periodo largo de tratamiento (aprox. 7 años) - Necesidad de una solución combinada (aislamiento previo sin valorar) - Grandes volúmenes de agua a tratar	1.800.000.000 Pts. (»10.800.000 €)
Land Farming o biodegradación anaerobia	- Coste medio a bajo - Solución permanente - Necesario un análisis previo de viabilidad - Periodo largo de tratamiento (aprox. 7 años) - Necesidad de excavación previa del suelo - Necesidad de áreas extensas y des pobladas - Grandes volúmenes de agua a tratar	2.500.000.000 Pts. (»15.000.000 €)

- Volumen de material a tratar. La magnitud de volúmenes como los que se han estimado en la zona investigada, superiores a 140.000 m³, hacen casi impensable su excavación, transporte y posterior restitución.
- La excavación de todo este volumen de suelos contaminados traería consigo una serie de inconvenientes añadidos que encarecería mucho su tratamiento, tales como las medidas a adoptar

para evitar las emisiones de polvo y partículas contaminadas a la atmósfera, el transporte de residuos peligrosos a grandes distancias (el centro de tratamiento de residuos peligrosos más próximo se localizaba a más de 200 Km), el aumento del volumen de aguas a tratar (el nivel del acuífero subterráneo se encuentra alojado, en parte, en los suelos contaminados).

- Por otro lado, aplicar la alternativa elegida supone

el confinamiento y control del foco contaminante de forma inmediata, ya que una vez realizadas las pantallas impermeabilizantes y el sellado superficial, se puede considerar que la fuente contaminante está controlada.

IX. MODELIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CELDA DE SEGURIDAD Y DEL TRANSPORTE DEL HCH

X. PLANTEAMIENTO

Para el diseño de las pantallas se realizó una investigación geotécnica detallada del perímetro de las pantallas, determinando la naturaleza de los suelos, su permeabilidad, nivel freático, cálculo de la profundidad óptima de pantalla, etc. La investigación se planificó en base a la perforación de sondeos en el perímetro que ocupará la pantalla así como en su interior. Igualmente y para conocer de una manera continua la compacidad de los diferentes niveles geotécnicos, se procedió a la realización de ensayos de penetración dinámica tipo Borro.

Una vez conocida la distribución especial de los diferentes niveles geológicos y puesto de manifiesto la complejidad del acuífero, se consideró necesaria la modelización del mismo, con la que se pretendía comprobar la eficacia del sellado de la porción de suelo contaminado mediante una celda de seguridad. La elaboración de un modelo numérico (Blasco *et al.*, 2001) de las aguas subterráneas fue abordada para dar respuesta a dos aspectos básicos de la solución que se proponía:

- Analizar el comportamiento hidrodinámico de las aguas subterráneas ante la construcción de la celda de seguridad y extraer las conclusiones pertinentes sobre sus parámetros constructivos.

- Comprobar la eficacia del sellado de la porción de suelo contaminado mediante la comparación de dos escenarios futuros de evolución del penacho de contaminación que afecta a las aguas subterráneas, considerando o no la existencia de la celda.

El primero de estos aspectos contempló la realización de un modelado tridimensional del flujo de las aguas subterráneas, y el segundo fue abordado mediante el modelado del transporte del contaminante (Eptisa, 1999b; 2000).

XI. MODELO TRIDIMENSIONAL DE FLUJO SUBTERRÁNEO

Para analizar el comportamiento hidrodinámico de las aguas subterráneas se realizaron una serie de actividades sucesivas, que fueron las siguientes:

- Establecimiento del modelo conceptual de funcionamiento de las aguas subterráneas.
- Discretización espacial de la zona modelada en columnas, filas y capas.
- Asignación de parámetros hidráulicos (permeabilidad y porosidad) a las celdas y establecimiento de las condiciones de contorno del modelo.
- Reproducción con el modelo de la situación actual mediante la realización de un ajuste en régimen permanente.
- Valoración de diferentes hipótesis constructivas de la solución mediante la simulación de las mismas con el modelo.

Para la realización del modelo numérico de flujo de la zona de estudio se ha utilizado el paquete informático Visual MODFLOW.

XII. MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO

El área de afección hidrogeológica de la celda de seguridad del polígono de Torneiros se consideró limitado de la siguiente manera:

- Al E, por el cauce del río Louro.
- Al S y SO, por el cauce del arroyo de Laxes.
- Al NO, por el contacto entre los materiales detríticos y los neises y esquistos, que se considera, en la práctica, coincidente con el trazado de la carretera que une las localidades de Porriño y Pontellas.
- Al NE, con el cauce de un arroyo que en la actualidad se encuentra relleno con materiales antrópicos.

La piezometría de la zona muestra una clara pendiente hacia el río Louro y el tramo bajo del arroyo de Laxes, con direcciones de flujo preferenciales NO SE y gradiente hidráulico de aproximadamente el 2% en la parte alta de la zona, bajando al 1.3 % en la zona más próxima a la carretera N 550, que a su vez coincide con una topografía más suave. Por otro lado, se aprecia una inflexión en la parte central de la zona que corresponde a una línea preferencial de flujo debida muy posiblemente a la existencia del paleocauce mencionado anteriormente.

A partir de la disposición geológica de los materiales que constituyen el acuífero y del análisis de la piezometría, el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico de la zona asumido contempla la recarga del

acuífero mediante la infiltración del agua de lluvia y la descarga mediante descargas directas a los cauces del río Louro y del arroyo de Laxes, más una descarga invisible al paleocauce del antiguo arroyo. La dirección del flujo dentro del acuífero tenderá a ser sensiblemente horizontal, debido al carácter fundamentalmente libre del acuífero.

El acuífero fue discretizado espacialmente mediante la superposición de una malla de elementos rectangulares de dimensión variable que se ajustó a los límites del área de funcionamiento hidrogeológico, con una extensión superficial de 1180 m de largo y de 880 m de ancho, definida por 73 filas en la dirección Y y 56 columnas en la dirección X (Fig. 4). Por lo que respecta a la dimensión Z, se consideró desde la cota 70 m hasta la 110 m. Los 40 m de profundidad modelados fueron discretizados mediante 27 capas de espesor variable.

XIII. ASIGNACIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS Y CONDICIONES DE CONTORNO

Individualmente, cada celda ha sido atribuida a una unidad hidroestratigráfica equivalente a uno o varios términos litológicos descritos en el estudio geotécnico. Tras el ajuste en régimen permanente efectuado, los parámetros hidráulicos finalmente asignados a cada unidad hidroestratigráfica fueron los señalados en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros hidráulicos ajustados

Unidad Hidroestratigráfica	Permeabilidad (m/s)		Porosidad Eficaz
	Horizontal	Vertical	
Relleno (K)	1.2E-05	2.4E-06	15%
Arenas (A-A1)	4.9E-06	9.8E-07	10%
Limos (B-B1)	9.5E-07	1.9E-07	1%
Gravas (C-D)	5.7E-05	1.1E-05	10%
Suelo residual (E)	2.3E-05	4.7E-06	10%

Las condiciones de contorno impuestas al modelo reprodujeron las entradas y salidas de agua del sistema:

- La recarga superficial del acuífero correspondiente a la infiltración del agua de lluvia. La precipitación media anual sobre la cuenca del río Louro se cifra en unos 1600 l/m², de los cuales se convierten en escorrentía del orden del 67%, es decir, unos 1100 l/m². La parte que de esta escorrentía se infiltra constituye la recarga de los acuíferos, y su valor depende, fundamentalmente, de la pendiente y de las características del terreno. En el caso concreto de los acuíferos aluviales del río Louro, se puede pensar en que del orden del 40% de la escorrentía total se infiltrará, lo que representaría una recarga unitaria de unos 400 l/m².
- La descarga del acuífero en los cauces del río Louro y del arroyo de Laxes. Para ello se ha establecido condición de río en las celdas correspondientes a estos cauces. Con esta condición, cuando el nivel del agua en la celda sea superior a la cota del cauce, el acuífero cederá agua hacia el río, y en el caso de que el nivel en la celda sea inferior a la cota del cauce, el río cederá agua al acuífero.
- La descarga del acuífero en el paleocauce del arroyo. En este caso se ha establecido condición de manantial en las celdas por las que

se supone que discurría el arroyo. La condición de manantial es similar a la de río descrita anteriormente, con la excepción de que un manantial nunca puede recargar al acuífero aunque el nivel del agua en la celda descienda por debajo de la cota de emergencia; en ese caso, el manantial únicamente deja de drenar el acuífero.

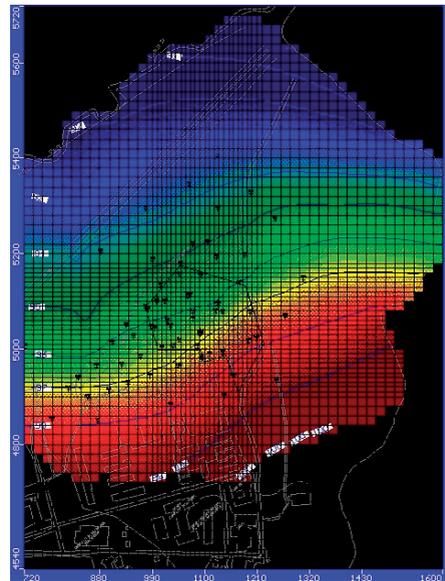


Fig. 4: Situación piezométrica previa a la construcción de la celda

Se efectuó un ajuste en régimen permanente del modelo con el objetivo de reproducir, de la manera más lógica posible desde un punto de vista hidrogeológico, la situación hidrodinámica reflejada en la piezometría real del acuífero, que correspondía a la situación previamente a cualquier actuación. En la Fig. 4 se observan los resultados del ajuste en régimen permanente que reproduce la situación en la zona modelada.

XIV. SIMULACIÓN DE HIPÓTESIS CONSTRUCTIVAS

Desde el punto de vista de la simulación del comportamiento de las aguas subterráneas mediante el modelo de flujo, el efecto de la impermeabilización superficial y de la construcción de las pantallas impermeables que constituyen la celda de seguridad se simuló de la siguiente forma:

- La impermeabilización superficial del terreno dentro de la celda se simuló mediante la anulación de la recarga por infiltración de agua de lluvia en las columnas correspondientes.
- La existencia de pantallas impermeables fue simulada mediante la inclusión entre las celdas correspondientes (del modelo) de barreras que impidan el flujo horizontal de agua entre ellas.

Mediante estas herramientas, y partiendo siempre de la situación hidrodinámica previa a la construcción de la celda representada por el ajuste en régimen permanente realizado, se simularon una serie de hipótesis constructivas que contemplaban pantallas de diferente profundidad y la construcción de pozos y drenes en el interior del recinto (Fig. 5

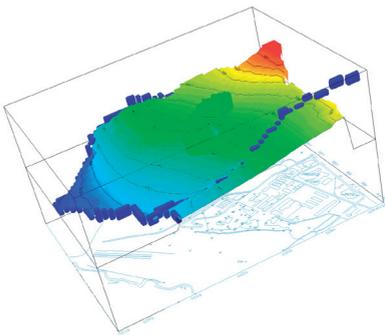


Fig. 5: Simulación de hipótesis constructivas

Mediante la comparación entre los resultados de las hipótesis y la situación previa se llegó a las siguientes conclusiones:

- Cualquier solución para evitar la propagación de la contaminación pasa por la impermeabilización de la superficie del terreno contaminado.
- La construcción de una celda de seguridad constituida, exclusivamente, por la impermeabilización superficial más unas pantallas impermeables perimetrales, e independientemente de la profundidad que alcancen, no sería capaz de desaturar la totalidad de la zona contaminada, ni impediría la propagación de parte de las aguas contaminadas por debajo de las pantallas en dirección al río Louro si estas no alcanzasen la base impermeable de la cuenca que constituyen los granitos, o si no se efectuaba una reducción del nivel freático en el interior mediante un dispositivo adicional compuesto por drenes longitudinales y un pozo de bombeo.

XV. PREVISIÓN DE EVOLUCIÓN FUTURA DE LA CONTAMINACIÓN

Los posibles mecanismos de escape de la contaminación encerrada dentro de la celda prevista eran:

- La filtración por debajo de las pantallas de la celda, en el caso de que éstas no

alcancen en profundidad un nivel significativamente impermeable.

- La filtración a través de las pantallas que, aunque nominalmente son impermeables, en la realidad rara vez alcanzan valores de permeabilidad menores de 1×10^{-10} m/s. Esta “permeabilidad”, con ser muy baja (sobre todo en relación con los materiales detríticos que constituyen el acuífero), no es nula, y, por lo tanto, implica la posibilidad de un flujo, de agua subterránea a su través, insignificante si se compara con el anterior mecanismo, pero no nulo.

En un primer momento, el diseño de la celda de seguridad contemplaba que las pantallas alcanzasen una profundidad suficientemente grande como para reducir significativamente el gradiente hidráulico dentro de la celda. Debido a que en aquella fase no se había definido la situación en profundidad de los materiales graníticos que constituyen el fondo de la cuenca sedimentaria, se consideró que las pantallas no poseían cierre estanco en profundidad. Por este motivo, el mecanismo de escape de la contaminación más significativo se consideraba que era la filtración por debajo de las pantallas, siendo prácticamente despreciable la filtración a su través.

Con posterioridad, y mediante la realización de 4 sondeos profundos y un estudio geofísico, quedó establecido que en el recinto que se pretendía apantallar los granitos se encontraban a una profundidad próxima a los 30 m. Finalmente, el proyecto definitivo de la celda de seguridad contempló

una profundidad de pantallas suficiente como para que éstas se apoyasen sobre los granitos, lo que supone la anulación prácticamente total del gradiente hidráulico en el interior de las pantallas y proporciona un cierre estanco en profundidad a la celda de seguridad.

Desde el punto de vista de la propagación de las aguas subterráneas contaminadas, el hecho de considerar un cierre estanco en el fondo de la celda supone que la única forma de propagación de la contaminación es a través de las pantallas, con lo que la seguridad de la celda aumenta muy considerablemente.

Con el objeto de evaluar la bondad de los efectos que sobre la propagación de las aguas subterráneas contaminadas tendrá el diseño definitivo de la celda de seguridad se realizaron las siguientes actividades:

- Simulación en régimen transitorio de la evolución de la situación hidrodinámica una vez que se construya la celda.
- Modelización del transporte de contaminantes para reproducir la situación previa a la celda y simular el escenario futuro en el caso de que no se construyese la celda.
- Modelización del transporte de contaminantes para simular el escenario futuro una vez que se construya la celda partiendo de la situación previa.

Al igual que en el caso de las modelizaciones efectuadas con anterioridad, el paquete informático utilizado ha sido Visual MODFLOW. El modelo utilizado para simular el transporte de contaminantes ha sido MT3D

XVI. EVOLUCIÓN DE LA SITUACIÓN HIDRODINÁMICA

Para realizar la simulación en régimen transitorio de los efectos de la construcción de la celda de seguridad se tomó, como punto de partido lógico, la modelización tridimensional de flujo en régimen permanente con la que se simularon anteriormente las alternativas de diseño de las pantallas, con las correspondientes modificaciones para acomodar los nuevos datos del subsuelo y de las pantallas.

Una vez efectuadas en el modelo estas modificaciones, se simuló la evolución de la situación piezométrica en la zona durante un periodo de 100 años, partiendo de una situación piezométrica previa a cualquier actuación relacionada con la construcción de la celda de seguridad. Las conclusiones fueron las siguientes:

- El efecto de la celda es la drástica disminución del gradiente hidráulico dentro de la celda y, por tanto, la práctica anulación de la velocidad y del flujo de agua dentro de la misma. Partiendo de un gradiente previo a la construcción de la celda del 12‰, al cabo de 10 años se reduciría al 5‰ y transcurridos 20 años al 0,1‰ (Fig. 6).

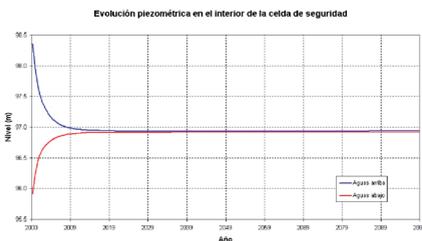


Fig. 6. Evolución piezométrica en el interior de la celda de la celda

- El hecho de que el gradiente dentro de la celda no llegue a ser nulo es consecuencia de que no se han considerado las pantallas totalmente impermeables ($k_{pantalla} = 1 \times 10^{-10}$ m/s), lo cual constituye un hecho real (Fig. 7).

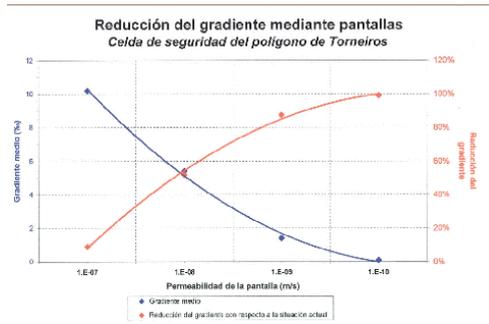


Fig. 7: Reducción del gradiente mediante pantallas

XVII. MODELADO DEL TRANSPORTE DE HCH

En primer lugar, el modelo de transporte debía reproducir la magnitud y extensión de las aguas contaminadas por HCH que estaban exclusivamente relacionadas con la porción de suelo contaminado que se pretendía aislar mediante la celda de seguridad. La reproducción de esa situación mediante un ajuste en régimen transitorio sirvió para determinar, de forma aproximada, los principales parámetros que gobernaban el transporte del contaminante.

En función de la escasez de datos empíricos relacionados con los parámetros que controlan los posibles mecanismos el transporte de contaminantes en el modelo se consideró oportuno considerar únicamente aquellos procesos que se consideran imprescindibles para reproducir la extensión y el alcance de la contaminación por HCH, con

Tabla 3. Parámetros relacionados con los mecanismos de transporte considerados en este estudio.

MECANISMO DE TRANSPORTE	PARÁMETRO	VALOR ADOPTADO
Advección	Ninguno	Ninguno
Dispersión	Dispersividad horizontal	1 m
	Dispersividad transversal horizontal	0,1 m
	Dispersividad transversal vertical	0,01 m
	Coefficiente de difusión molecular	0,0
Adsorción	Densidad media	1,7 g/cm ³
	Coefficiente de distribución	5E-09

objeto de no aumentar el número de factores, en este caso prácticamente desconocidos, que pudieran tener influencia sobre los resultados obtenidos.

Por tanto, los mecanismos de transporte que se consideraron en el modelo aplicado en el caso de Torneiros fueron: advección, dispersión y adsorción en equilibrio lineal. Los valores asignados a los parámetros que controlan los mecanismos de transporte considerados se muestran en la Tabla 3.

Por lo que respecta al mecanismo por el cual el agua subterránea se contamina al entrar en contacto con el suelo polucionado, ante la falta de conocimiento real sobre el mecanismo de transferencia de HCH entre el suelo y el agua subterránea, se adoptó el criterio simplista de considerar una producción

continua de agua subterránea con una concentración constante en aquellas celdas del modelo que se encuentren por debajo del nivel freático. El valor de concentración que mejor reproducía la situación fue de 200 µg/l. Este valor se mantuvo para los escenarios futuros, con o sin celda.

Mediante la reproducción, en primer lugar, de la evolución más probable del penacho de contaminación previa a las actuaciones (Fig. 8) y, posteriormente, simulando la evolución futura del mismo considerando o no la existencia de la celda de seguridad, se llegó a la conclusión de que la construcción de una celda de seguridad tenía una serie de efectos claramente beneficiosos de cara a evitar o reducir la propagación de aguas contaminadas por HCH, dado que:

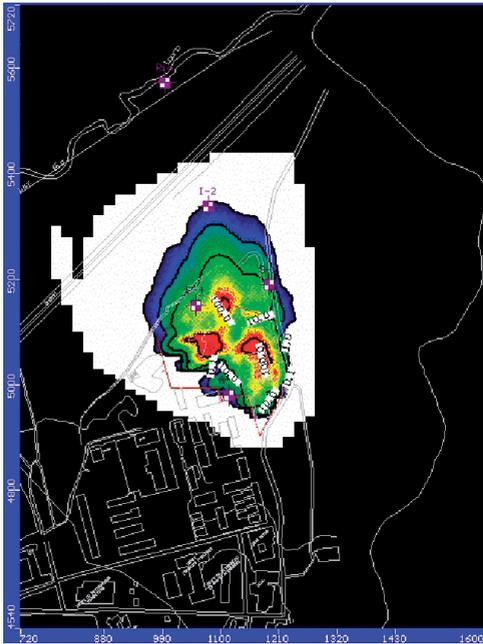


Fig. 8: Modelado del transporte de HCH

- Se reduce el volumen de suelo contaminado que se encuentra por debajo del nivel freático, por lo que será menor el volumen de suelo que produce la contaminación de las aguas subterráneas.
- Desciende la velocidad y el flujo del agua subterránea (aprox. 120 veces) que quede dentro de la celda y que seguirá estando en contacto con el suelo contaminado, al reducirse en esa misma proporción su gradiente hidráulico.
- Se estabiliza la concentración de HCH en el agua subterránea que queda incluido dentro de la celda, que de otra forma seguiría aumentando (Fig. 9).

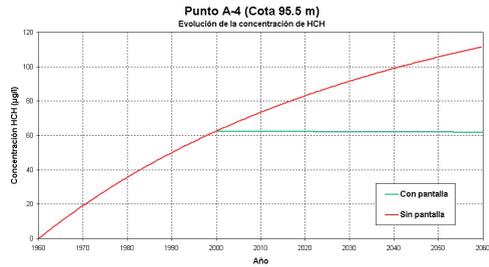


Fig. 9: Evolución de la concentración de HCH dentro de la celda

- Disminuye la extensión superficial y vertical del penacho de contaminación para el mismo periodo de tiempo (Fig. 10).

Previsión año 2060
Sin celda Con celda

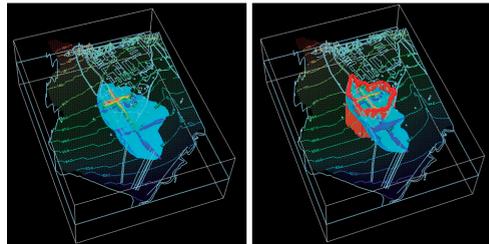


Fig. 10: Evolución de la contaminación

- Disminuye el gradiente temporal de aumento de concentración de HCH en aquellos puntos que serán próximamente alcanzados por el penacho de contaminación de las aguas subterráneas que quedarán fuera de la celda y que ya están contaminadas (Fig. 11).

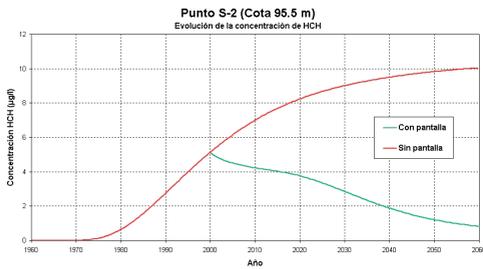


Fig. 11: Evolución de la concentración de HCH fuera de la celda

XVIII. PROYECTO DE CONFINAMIENTO

XIX. DESCRIPCIÓN GENERAL

El confinamiento consiste en la creación de una celda de seguridad “in situ”, lo que supone la formación de unas pantallas perimetrales que aislen totalmente la zona contaminada, y la impermeabilización

superior para evitar la infiltración del agua de lluvia, y la desviación de las aguas de escorrentía superficial. El área a confinar era la Zona A₁ (Fig. 3), por haberse detectado niveles superiores al nivel de intervención tanto en los suelos como en las aguas subterráneas. El perímetro total de pantalla es de 841 m y el área confinada será de 37.700 m² (Fig. 12). En un área del Circuito de Cicloturista donde la contaminación alcanzaba profundidades inferiores a 2,0 m. (Zona A₂) se propuso la excavación y restitución por suelos no contaminados, trasladando los materiales contaminados al interior de la celda. La profundidad de la pantalla debería ser tal, que garantizase la estanqueidad de la celda de aislamiento en su base, bien entregándose en terrenos arcillosos o sustrato rocoso sano, o bien dando suficiente longitud a la misma, para que el flujo subterráneo no produzca arrastres de contaminantes al exterior de la celda.



Fig. 12: Configuración final de la celda de seguridad

La obra se ejecutó en dos fases, correspondiendo la primera de ellas (1999-2000) a la excavación de la zona sur de la pista de cicloturismo donde se encontraba un foco superficial de residuos de HCH. Los materiales extraídos fueron vertidos en el sector de mayor contaminación, y posteriormente se relleno el área excavada con suelo no contaminado. La segunda fase consistente en la ejecución de la pantalla perimetral, la realización del sellado superficial y del drenaje perimetral, así como del ajardinamiento y reposición pistas deportivas, fue ejecutada entre los años 2000 y 2001.



Fig. 13: Excavadora bivalva

XX. PANTALLA PERIMETRAL

La pantalla perimetral ejecutada para el confinamiento del suelo contaminado está

construida con una mezcla de cemento-bentonita. El proyecto consideraba para la formación de este cemento-bentonita la mezcla de bentonita con cemento Portland. Las proporciones utilizadas serían las siguientes: bentonita: 50 Kg, cemento: 120-150 Kg, y relación agua-cemento: 4 a 5. Estas pantallas se ejecutaron *in situ* mediante relleno con la mezcla elaborada de zanjas excavadas mediante cuchara bivalva con ayuda de muretes guía. En la Fig. 14 se explica el sistema constructivo consistente en la excavación de paneles alternos que son conectados con otros nuevos una vez están consolidados. La longitud de los paneles o bataches fue de unos 4 metros, siendo el solape entre los mismos de un 10% de su longitud. La profundidad media alcanzada por las pantallas fue de 28,5 metros que corresponde con la necesaria para alcanzar el sustrato rocoso.

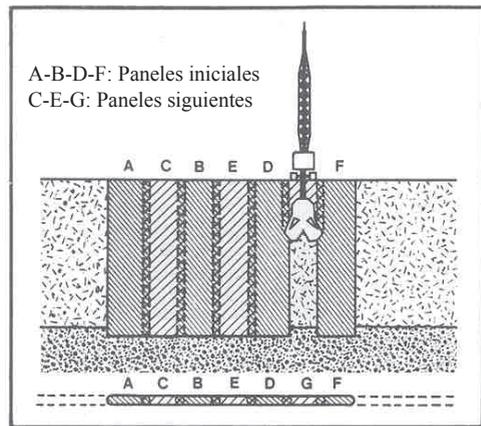


Fig. 14: Sistema de ejecución de la pantalla

XXI. SELLADO SUPERFICIAL

Se planteó la construcción de un sellado superficial multicapa que por un lado evite la infiltración de agua de escorrentía al interior del recinto y por otra parte impida el contacto de los habitantes del entorno con el

material contaminado El sellado multicapa está compuesto por los siguientes materiales ordenados de superficie a fondo:

- Tierra vegetal: con un espesor de 1 metro y alto contenido en materia orgánica que permita el desarrollo de vegetación.
- Capa de jabre: con un espesor de 30 centímetros. La función principal de esta capa es la de proteger las capas sintéticas que se instalarán inferiormente.
- Geocompuesto drenante: Capa drenante sintética, cuya misión principal es recoger las aguas de escorrentía, conduciéndolas hasta el dren perimetral proyectado. Mediante esta solución se minimiza el riesgo de posibles roturas de la lámina de bentonita que se podrían producir durante la extensión de la capa de gravas convencional, reduciendo los esfuerzos de punzonamiento en la capa inferior
- Geocompuesto de bentonita: Se proyectó la instalación de un geocompuesto bentonítico impermeabilizante formado por una lámina de bentonita. Los principales motivos para su elección son la facilidad de colocación no existiendo ningún riesgo de provocar estados tensionales en la lámina como consecuencia de la escasa pendiente de la zona. Al plantearse la construcción de estos compuestos

sintéticos se consigue minimizar el impacto visual que ocasionaría la extensión de las capas de materiales naturales (gravas y arcilla) de elevado espesor utilizadas usualmente.

- Geotextil: Se dispone un geotextil de 200 gramos de peso por metro cuadrado entre los residuos y el geocompuesto de bentonita (Fig. 15). Las funciones de dicho geotextil son, por una parte, evitar que el geocompuesto entre en contacto directo con el suelo y, por otra, protegerlo de posibles punzonamientos producidos por pequeñas irregularidades que pudieran producirse en la superficie del terraplén durante la ejecución del sellado.



Fig. 15: Extensión de bentonita sobre geotextil

Las aguas que se recojan en el sellado a través del geocompuesto drenante, son recogidas en una canalización perimetral formada por una cuneta trapecial que a su vez permitirá el anclaje de los elementos sintéticos que constituyen el drenaje.

XXII. REPOSICIÓN DE SERVICIOS

Con objeto de restaurar la zona de actuación se proyectó su tratamiento y ajardinamiento, de manera que no se perciban las obras realizadas y se recuperen los usos públicos del espacio. Asimismo, para la integración en el medio urbano que rodea a la actuación, se proyectó la construcción de un parque infantil, y de pistas deportivas, que permite adecuar el entorno para su uso deportivo (Fig. 16).



Fig. 16: Ajardinamiento definitivo

XXIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Blasco Herguedas, O., Martínez Lozano, F., Crespo González, N., Rega Piñeiro, J. (2001): Modelado del flujo y de la contaminación de las aguas subterráneas en el polígono de Torneiros (O Porriño, Pontevedra). En: *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos (Actas del VII Simposio de Hidrogeología)*, Madrid, XXIV, 403-413.

Crespo González, N., Rega Piñeiro, J., Martínez Lozano, F., González Rodríguez, M.O. (2000): Investigación de suelos y aguas subterráneas contaminadas por hexaclorociclohexano en el polígono de viviendas de Torneiros -O Porriño- (Pontevedra). En: *Jornadas hispano-lusas sobre las aguas subter-*

ráneas en el noroeste de la Península Ibérica, A Coruña. 323-330

- Crespo González, N., Pan-Montojo González, F., Rega Piñeiro, J., Casas, J.L. (2001): HCH polluted soils in highly populated areas in "O Porriño"(Galicia, Northwest Spain). En: *6th International HCH and Pesticides Forum*, Poznan, Poland, 175-180.
- Eptisa Servicios de Ingeniería S.A. (1999): Informe-resumen de los trabajos realizados con relación a la investigación de detalle de la contaminación por HCH en el entorno del polígono de Torneiros -O Porriño- (Pontevedra). Consellería de Medio Ambiente. Xunta de Galicia.
- Eptisa Servicios de Ingeniería S.A. (1999): Modelización hidrogeológica tridimensional para la definición del proyecto de confinamiento del suelo contaminado por HCH en el polígono de Torneiros. O Porriño (Pontevedra). N° REF.: 848/99. Dirección Xeral de Calidade e Avaliación Ambiental. Consellería de Medio Ambiente. Xunta de Galicia.
- Eptisa Servicios de Ingeniería S.A. (2000): Modelización de transporte de contaminantes para el proyecto de confinamiento del suelo contaminado por HCH en el Polígono de Torneiros. O Porriño (Pontevedra). 2000. N°REF. EMA 007. Dirección Xeral de Calidade e Avaliación Ambiental. Consellería de Medio Ambiente. Xunta de Galicia
- IHOBE – Sociedad Pública de Gestión Ambiental (1998). Guías Metodológicas para la Investigación de la Contaminación del Suelo. Ed. Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco.
- VROM. Ministerio de Vivienda , Planifi-

- cación del Territorio y Medio Ambiente Holandés; Dirección General de Protección Medioambiental, Departamento de Protección del Suelo (2000): Circular sobre valores objetivo y valores de intervención para la recuperación del suelo y sus Anexos A-D. Netherlands Government Gazette, No.39 - 04 de febrero de 2000.
- Xunta de Galicia. Consellería de Industria e Comercio (1996). Estudio sobre a actualización do Inventario de Suelos Contaminados, xerarquización e desenvolvemento dunha Lexislación para a protección do Solo en Galicia.
- Xunta de Galicia. Consellería de Medio Ambiente (1999): Zonas de actuación dentro del marco de la investigación de suelos contaminados por residuos de lindano en el polígono de Torneiros – O Porriño (Pontevedra)