

EL LINDANO EN EL RÍO GÁLLEGO: SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA DE SU EVOLUCIÓN A LO LARGO DEL CAUCE

César GONZÁLEZ¹
José Antonio CUCHÍ²

RESUMEN.— El artículo presenta la elaboración de un modelo bidimensional de simulación hidrodinámica del río Gállego con el programa informático Iber. El tramo de estudio abarca desde la localidad de Sabiñánigo (provincia de Huesca) hasta la de Puendeluna (provincia de Zaragoza). El objetivo es la simulación detallada de la evolución temporal y espacial de la concentración de hexaclorociclohexano (HCH) en sus diversas formas isoméricas (lindano y otras), procedente del foco contaminante del vertedero de Bailín y de otras localizaciones cercanas. Los resultados obtenidos permiten conocer, bajo algunas aproximaciones y simplificaciones, la evolución de la concentración del contaminante a lo largo del río y del tiempo, dando lugar a un conjunto de gráficas, imágenes y vídeos que permiten entender y analizar mejor los episodios de contaminación por lindano en el río.

ABSTRACT.— This paper presents the development of a two-dimensional model of hydrodynamic simulation of the Gállego River using the Iber software. It covers the area between Sabiñánigo (province of Huesca) and Puendeluna (province of Zaragoza). The objective is to obtain a detailed simulation of the temporal and spatial evolution of the concentration of

Recepción del original: 19-12-2016

¹ Área de Mecánica de Fluidos. Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza. Carretera de Cuarte, s/n. E-22071 HUESCA. cesargon@unizar.es

² Área de Ingeniería Agroforestal. Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza. Carretera de Cuarte, s/n. E-22071 HUESCA. cuchi@unizar.es

hexachlorocyclohexane (HCH) and its isomers (lindane and others), produced by the contaminating source of the Bailín landfill and other nearby locations. The results, based on estimations and simplifications, show the evolution of the concentration of the contaminant through the river and over time, illustrated by a set of graphs, images and videos which allow to better understand and analyse the process of lindane contamination in the river.

KEY WORDS.— Lindane, Gállego River, hydrodynamics, water contamination, Sabiñánigo (Spain).

INTRODUCCIÓN

El río Gállego pertenece a la cuenca del río Ebro, siendo uno de sus principales afluentes por la margen izquierda. Tiene su nacimiento en el Col d'Àneu, a 2200 metros de altitud, junto al Portalet (Huesca), y su desembocadura en Zaragoza, a 180 metros de altitud. Su longitud es de 193,2 kilómetros, por lo que su pendiente media es aproximadamente del 1%. La cuenca del río Gállego tiene unos 4000 km², con forma alargada y orientación norte-sur, estando situada íntegramente dentro de la Comunidad Autónoma de Aragón. Los afluentes del río Gállego son barrancos o ríos cortos. En el tramo Sabiñánigo-Puendeluna, que es el que se estudia en este artículo, destacan como afluentes los ríos Basa, Guarga, Moro, Garona, Asabón y Subién.

El río Gállego se encuentra fuertemente regulado, bien para aprovechamientos hidroeléctricos, bien para regadío. La aportación media al río Ebro es de 12,5 m³/s, lo cual representa un pequeño porcentaje del caudal natural (CHE y GA, 2007). Los principales embalses en el cauce son los de Respomuso (en el río Aguas Limpias, 17 hm³), Lanuza (17 hm³), Búbal (64 hm³), Sabiñánigo (1 hm³), La Peña (15 hm³) y Ardisa (1,4 hm³). El régimen de caudales regulado del río Gállego está supeditado a los usos agrícolas e hidroeléctricos que existen en él, donde algunas comunidades de regantes implicadas se benefician de ambos usos. En invierno, las sueltas de agua de los embalses permiten almacenar el agua proveniente de la fusión de la nieve pirenaica. Diversas centrales hidroeléctricas automatizadas configuran un turbinado en escalera de los caudales regulados, dejando muy mermado el cauce natural en determinados tramos (CHE y GA, 2007).

El embalse de La Peña pertenece a las comunidades de regantes del Bajo Gállego y desembalsa agua en continuo para regadío y para producción

hidroeléctrica tanto en la central de San Mateo como en la de Valdespartera, perteneciente a la Comunidad General de Riegos del Alto Aragón. Desde el embalse de Ardisa se deriva agua procedente de Búbal y Lanuza hasta el cercano embalse de La Sotonera (189 hm³), uno de los principales embalses de regulación de la Comunidad General de Riegos del Alto Aragón. En fase de proyecto se encuentra el embalse de Biscarrués (35 hm³) y en fase de aprobación el de Almudévar (170 hm³), ambos concebidos para ampliación de regadíos y aumento de garantía de suministro. En caso de realizarse, estas dos obras de regulación detraerían aún más caudales respecto de los que se extraen en la actualidad, con el probable deterioro general del estado de la masa de agua, que se uniría a otros impactos ambientales, económicos y sociales, completándose la intensa explotación y segmentación a que se ve sometido el río Gállego.

Entre los años 1975 y 1989, en el polígono industrial de la localidad de Sabiñánigo, la empresa Inquinosa se dedicaba a la producción de lindano (γ -hexaclorociclohexano), un producto utilizado como insecticida, muy contaminante y con una alta persistencia, y cuya producción se encuentra actualmente prohibida en la mayor parte del mundo. Los residuos de la actividad industrial de Inquinosa, altamente contaminantes, fueron gestionados indebidamente, de manera que entre 115 000 y 177 000 toneladas de residuos (CPNA, 2015) fueron depositados en diferentes ubicaciones sin las debidas garantías para la protección del medio ambiente y de la salud pública.

Principalmente los vertederos de Bailín (ALCALDE y cols., 2015) y de Sardas (PÉREZ y cols., 2015), pero también el recinto de la propia fábrica de Inquinosa, el embalse de Sabiñánigo y otras localizaciones difíciles de precisar (FERNÁNDEZ y cols., 2013), dejaron suelos, subsuelos y acuíferos altamente contaminados por lindano (FERNÁNDEZ y cols., 2015), así como por otros contaminantes orgánicos asociados (benceno, clorobenceno, clorofenoles...). El río Gállego, como desagüe natural de la zona contaminada, ha dispersado los contaminantes a lo largo de su recorrido (LACRUZ y cols., 2015; MICHAVILA y cols., 2014), y previsiblemente lo seguirá haciendo durante un largo periodo de tiempo. El lindano se ha propagado también por vía aérea, llegando a contaminar algunos ibones pirenaicos (SANTOLARIA y cols., 2015; PELEGRÍN y cols., 2015).

La elevada persistencia de este tipo de contaminantes ha convertido el entorno de Sabiñánigo en uno de los principales focos de contaminación por lindano en el mundo. Las consecuencias finales sobre el medio ambiente, la economía y la salud pública son difíciles de precisar, aunque parece claro que este problema puede limitar y condicionar en el futuro los diversos usos del agua del río Gállego (regadíos, abastecimiento urbano, usos ambientales, usos recreativos), como de hecho ya está sucediendo en la actualidad. En cuanto a los efectos sobre la salud pública, hasta la fecha no se ha realizado ningún estudio epidemiológico en la población ribereña del Gállego, expuesta desde hace mucho tiempo al contaminante a través de los usos urbanos del agua.

El problema de la contaminación por lindano en el entorno de Sabiñánigo no tiene actualmente una solución técnica contrastada y viable, y una parte de los esfuerzos de las administraciones competentes se debe centrar en amortiguar los efectos aguas abajo (CHE, 2008; CORCHO y cols., 2015; CORUJO y cols., 2015; CORUJO, 2015; FERNÁNDEZ y cols., 2015; GÓMEZ y cols., 2015; MIR, 2015). En este sentido, el presente artículo pretende aportar un mayor conocimiento de la hidrodinámica del río Gállego y de la dispersión de lindano a lo largo de su cauce, de forma que podría permitir evaluar posibles actuaciones de manera cuantitativa, al poder predecirse aproximadamente la evolución espacial y temporal de la concentración de lindano en las aguas del río en cada episodio de contaminación.

El objetivo principal de este artículo consiste en la elaboración de un modelo informático de simulación hidrodinámica bidimensional del río Gállego, desde la localidad de Sabiñánigo hasta la de Puendeluna, que incorpore el cálculo de la evolución del lindano y demás isómeros del hexaclorociclohexano (HCH). En adelante, se utilizará el término lindano para referirnos no solo al lindano, sino a todos los isómeros del HCH. El modelo se ha realizado mediante la herramienta informática Iber.

A modo de aplicación práctica del modelo elaborado, y como segundo objetivo, se estudia el efecto de la central hidroeléctrica de Carcavilla sobre la distribución del lindano, ya que el agua que se turбина en ella evita el efecto retardante y diluyente de la contaminación en el río que se produce en el embalse de La Peña.

MATERIAL Y MÉTODOS

Para la simulación hidrodinámica del río Gállego, se ha utilizado la herramienta informática Iber 2.3.2 (BLADÉ y cols., 2014). Se trata de un programa de simulación bidimensional de flujo en lámina libre, proporcionado por la Universidad Politécnica de Cataluña.

Datos de entrada

El programa Iber y otros similares resuelven las ecuaciones del movimiento bidimensional del agua en lámina libre (ecuaciones de Saint Venant) a partir de un conjunto variado de datos de entrada, mediante el Método de Diferencias Finitas. Para ello, en primer lugar, es necesario definir un ámbito

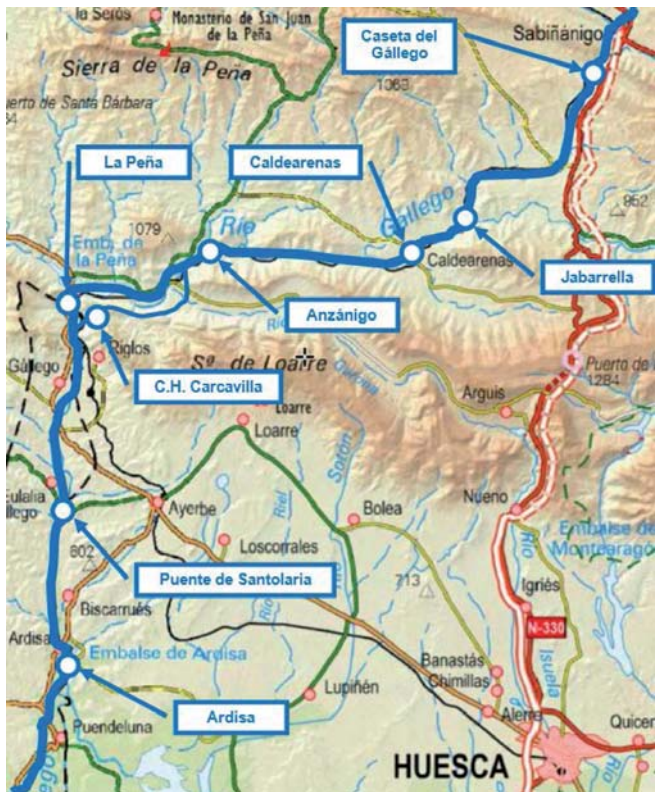


Fig. 1. Ámbito de estudio, con indicación de ubicaciones relevantes. (Mapa de fondo: Instituto Geográfico Nacional)

de estudio que abarque la porción del territorio necesaria para la correcta simulación hidráulica en las zonas de interés. El ámbito de estudio para este caso corresponde al tramo del río comprendido entre la desembocadura del barranco de Bailín (término municipal de Sabiñánigo) y la localidad de Puendeluna, en el límite provincial entre Huesca y Zaragoza, lo que corresponde a unos 67 kilómetros lineales de río. La figura 1 muestra el tramo estudiado, con indicación de la ubicación de los lugares que se nombrarán en este artículo.

Definido el espacio de simulación, es necesario concretar igualmente el tiempo de simulación, es decir, un intervalo temporal en el que se ha de calcular el movimiento del agua sobre el ámbito fijado. Se ha decidido elaborar el modelo a partir de los datos disponibles de la crecida del río Gállego ocurrida en octubre de 2014, donde se produjo un importante pico de contaminación por lindano. Concretamente, la simulación comienza a las 0:00 horas del 10 de octubre de 2014 y finaliza a las 12:00 horas del 20 de octubre de 2016.

Además del ámbito espacial y temporal, es necesario introducir otros datos de diversa naturaleza, que se detallan en los apartados siguientes.

Topografía del terreno

Se requiere conocer la topografía del terreno sobre el que se va a ejecutar la simulación hidrodinámica y, en su caso, la geometría de las obras hidráulicas u otros elementos en contacto con el medio hídrico. Para este trabajo se han utilizado los Modelos Digitales del Terreno facilitados por el Instituto Geográfico Nacional. Se han empleado las hojas numeradas como 177, 209, 210, 247 y 285, que abarcan todo el ámbito de estudio definido. Estos Modelos Digitales del Terreno se han tomado con resolución de 5 metros y formato de archivo ASCII matriz ESRI (asc), con sistema geodésico de referencia ETRS89.

Para la correcta modelización del embalse de La Peña se ha empleado una batimetría realizada el 18 de septiembre de 2014 por la empresa Ecohydros, S. L. La batimetría fue realizada con una ecosonda científica digital Biosonics-DTX con transductor de 200 kHz, montada en la borda de una embarcación neumática, en línea con el receptor de un equipo DGPS

Trimble Agp-132. La resolución de la batimetría es de 5 metros, previa interpolación a partir de los transectos realizados.

Malla de cálculo

La resolución de las ecuaciones de Saint-Venant requiere un mallado del terreno, para que quede configurado como un conjunto de celdas sobre las que poder aplicar el Método de Diferencias Finitas.

Se ha escogido una malla triangular no estructurada por su capacidad de adaptación al terreno irregular que se estudia. Dada la elevada longitud del tramo de río a analizar, la resolución de la malla se ha tomado de 50 metros para evitar tiempos de cálculo inasumibles. De este modo, la malla de cálculo queda compuesta por 14010 triángulos.

Coefficientes de rugosidad de Manning

Todo el ámbito de estudio debe tener asociado un coeficiente de rugosidad de Manning para tener en cuenta las fuerzas de fricción que se oponen al desplazamiento del agua. Este coeficiente depende principalmente de la naturaleza del terreno, por lo que puede ser espacialmente variable.

En este artículo, en vista del tamaño de malla escogido, se ha optado por considerar un valor homogéneo del coeficiente de Manning en todo el ámbito de estudio. Se ha tomado un valor convencional para lechos de ríos de $0,025 \text{ s/m}^{1/3}$, pese a que en determinados tramos del río podría adoptar valores algo mayores debidos a la mayor vegetación existente o a la elevada presencia de rocas de tamaño considerable. No obstante, en el proceso de calibración del modelo se ha considerado apropiado el valor adoptado.

Condiciones iniciales

Es necesario definir el estado inicial del sistema a estudiar, en el comienzo de la simulación temporal. Se ha tomado un calado de 0,5 metros como condición inicial en todo el río, para lograr rápidamente una situación estacionaria previa a la llegada del pico de contaminación que se va a estudiar. Para el embalse de La Peña, se ha considerado una condición inicial de cota

de agua de valor 539 msnm, correspondiente al máximo nivel normal del embalse. Se ha estudiado esta circunstancia por ser la más desfavorable ante la llegada de una crecida, anulando la capacidad de laminación del embalse. Al estudiar la calidad del agua, también hay que establecer un valor inicial para la concentración de lindano. Se ha tomado un valor de concentración nula de lindano en el río.

Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno deben detallar la evolución de caudales y concentraciones de lindano en las fronteras (contornos) del ámbito de estudio a lo largo de toda la simulación. Como condición de contorno de entrada de caudales, se han tomado los datos de aforo disponibles más cercanos al límite aguas arriba del ámbito de estudio, correspondientes a la estación de Anzánigo, perteneciente a la Confederación Hidrográfica del Ebro (estación A123). Como condición de contorno de concentración de lindano, se han tomado los datos recabados por LACRUZ y cols. (2015), con mediciones realizadas por el Gobierno de Aragón en la ubicación denominada

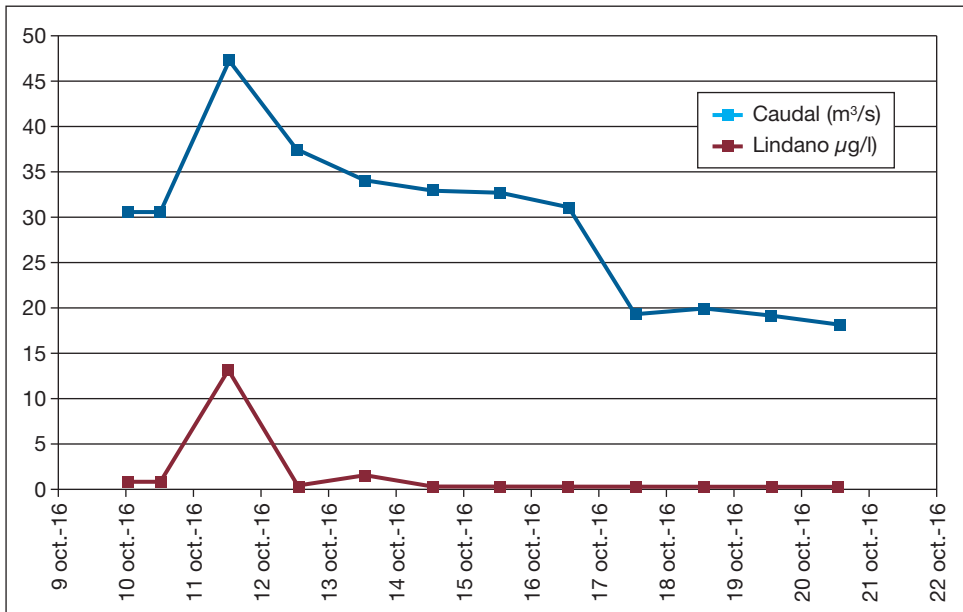


Fig. 2. Condiciones de contorno aguas arriba: caudal y concentración de lindano.

Caseta del Gállego, en las inmediaciones aguas abajo de la desembocadura del barranco de Bailín en el río Gállego.

La figura 2 representa gráficamente ambas condiciones de contorno aguas arriba: la de caudales y la de concentración de lindano. En la figura se observa un pico simultáneo de caudal y de concentración de lindano, fruto de las lluvias acaecidas en las fechas correspondientes. El pico de caudal fue de $47,3 \text{ m}^3/\text{s}$, y el pico de concentración de lindano fue de $13,2 \text{ microgramos por litro } (\mu\text{g}/\text{l})$, muy por encima del límite legal de $0,5 \mu\text{g}/\text{l}$ establecido para el agua de consumo humano según el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano (BOE, n.º 45, de 21 de febrero de 2003, pp. 7228-7244).

Como condición de contorno de salida de caudal aguas abajo, se ha establecido una condición de tipo caudal crítico, usual en este tipo de modelizaciones.

Modelo general del río Gállego

Toda la información detallada en los apartados anteriores se incorporó como datos de entrada en el programa Iber. En la figura 3 se muestra una imagen que recoge todo el ámbito de estudio, con indicación mediante

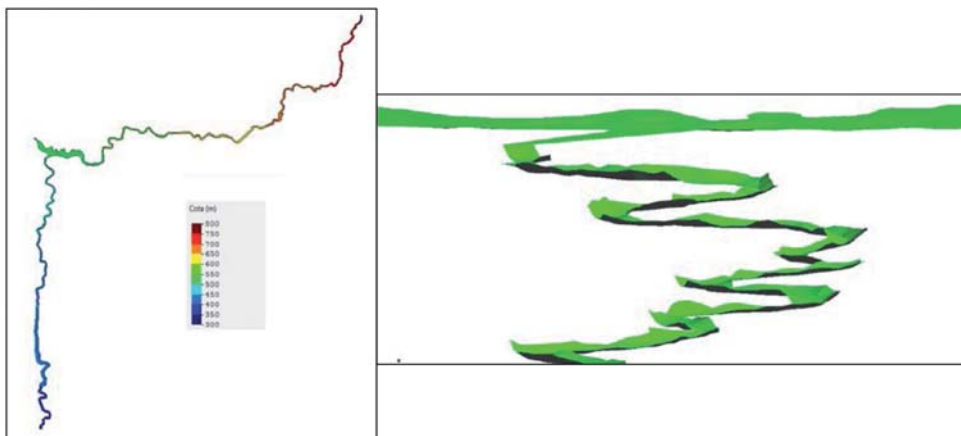


Fig. 3. Topografía del modelo del río Gállego (izquierda) y vista en perspectiva del tramo aguas abajo del embalse de La Peña (derecha).

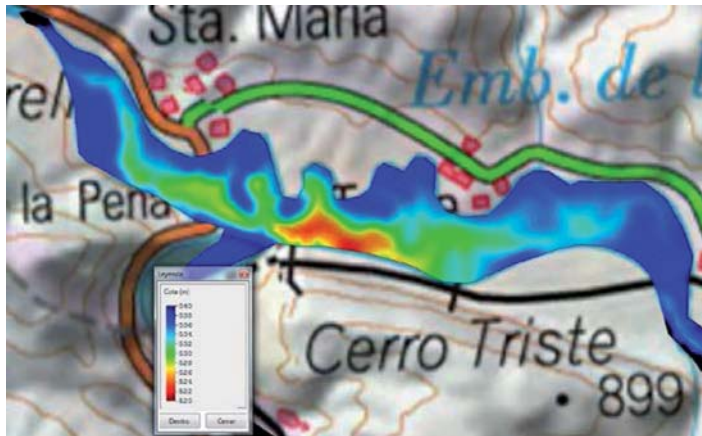


Fig. 4. Batimetría del embalse de La Peña.

escala de colores de la altitud de cada punto con respecto al nivel del mar. A la derecha de la figura, se observa también un detalle de la vista en perspectiva del modelo, correspondiente al tramo inmediatamente aguas abajo del embalse de La Peña. En la figura 4 se tiene una representación gráfica mediante escala de colores de la batimetría utilizada del embalse de La Peña, indicándose las cotas sobre el nivel del mar del fondo del embalse.

Simultáneamente a la resolución de las ecuaciones bidimensionales de movimiento del agua (ecuaciones de Saint-Venant), se resolvió la ecuación del transporte por convección-difusión para el caso del lindano, mediante la activación del módulo de calidad de aguas del programa Iber. Se decidió considerar el lindano como una sustancia conservativa para la simulación, sin términos de reacción, es decir, sin procesos de aparición o desaparición de lindano más allá de las cantidades establecidas como condiciones de contorno. Se estableció un periodo de simulación de 10 días, desde el día 10 hasta el día 20 de octubre de 2014. Se han extraído escenarios de resultados cada 2 horas, de manera que en cada simulación se han obtenido unos 120 escenarios sucesivos que reflejan la evolución temporal de las variables calculadas. Tales variables han sido el calado del agua, el caudal, la velocidad y la concentración de lindano. El tiempo de cálculo de cada simulación ha sido de unas 4,5 horas, en una computadora convencional con procesador Intel Core i3-5010U, con CPU a 2,10 GHz y con 4 GB de memoria RAM.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Bajo las hipótesis y aproximaciones expuestas, se han obtenido un conjunto de resultados del cálculo satisfactorios, en cuanto que se ha conseguido una simulación hidrodinámica correcta, incluyendo los parámetros de calidad del agua (concentración de lindano).

En la figura 5 se intenta mostrar de manera gráfica una visión general de los resultados obtenidos tras el proceso de simulación. En ella, se observa cómo, a partir del 11 de octubre de 2014, el pico de contaminación de lindano medido en la ubicación “Caseta del Gállego” se desplaza a lo largo del río.

La observación de los resultados obtenidos permite constatar dos hechos relevantes:

1. El embalse de La Peña tiene un “efecto retardante”, puesto que logra retener temporalmente la masa de agua contaminada. En efecto, el tiempo de permanencia del agua en el embalse sería de unos 3 o 4 días.
2. El embalse de La Peña tiene un “efecto diluyente”. La mezcla del agua contaminada con el agua relativamente limpia del embalse provoca un claro efecto de dilución en el embalse. La figura 6 muestra cómo el agua entra en el embalse con concentraciones de en torno a 12 $\mu\text{g/l}$, y sale con concentraciones de en torno a 9 $\mu\text{g/l}$.

El pulso principal de contaminación alcanza el final del ámbito de estudio aproximadamente 9 días después de su aparición en Sabiñánigo, tal como se observa en la figura 5. No obstante, la operación de la central hidroeléctrica de Carcavilla juega un papel de *by-pass*, eliminando el efecto retardante del embalse y provocando una llegada temprana de la contaminación (unos 4 días) a los tramos situados aguas abajo del embalse de La Peña.

La figura 6 muestra el detalle de la evolución de la concentración de lindano en el embalse de La Peña. Además de los efectos retardante y diluyente descritos, en la imagen del 13 de octubre de 2014 se puede apreciar un cambio en la tonalidad del azul en la descarga de la central de Carcavilla, debido a la llegada directa de agua contaminada desde la toma del canal

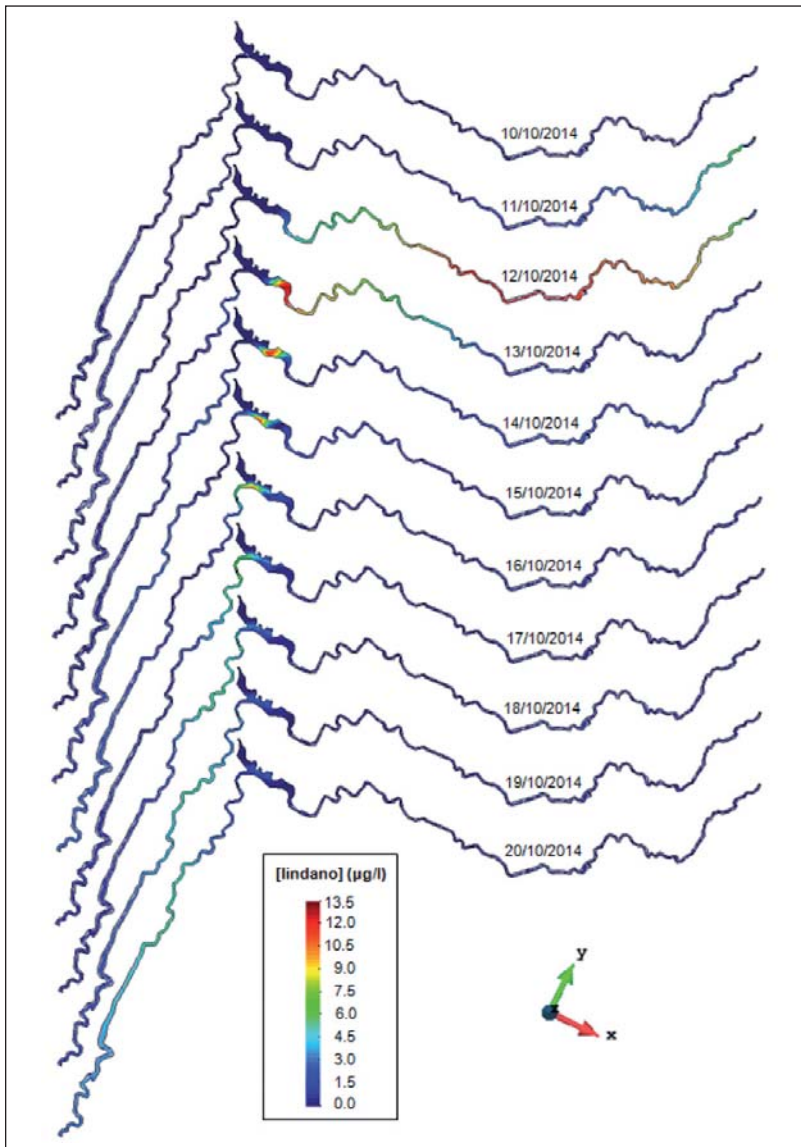


Fig. 5. Evolución temporal de la concentración de lindano a lo largo del río Gállego.

de Carcavilla, aguas arriba del embalse. La mayor o menor gravedad del efecto de este *by-pass* depende de la proporción existente en la mezcla de las aguas contaminadas turbinadas con las aguas todavía limpias que llegan desde el embalse.

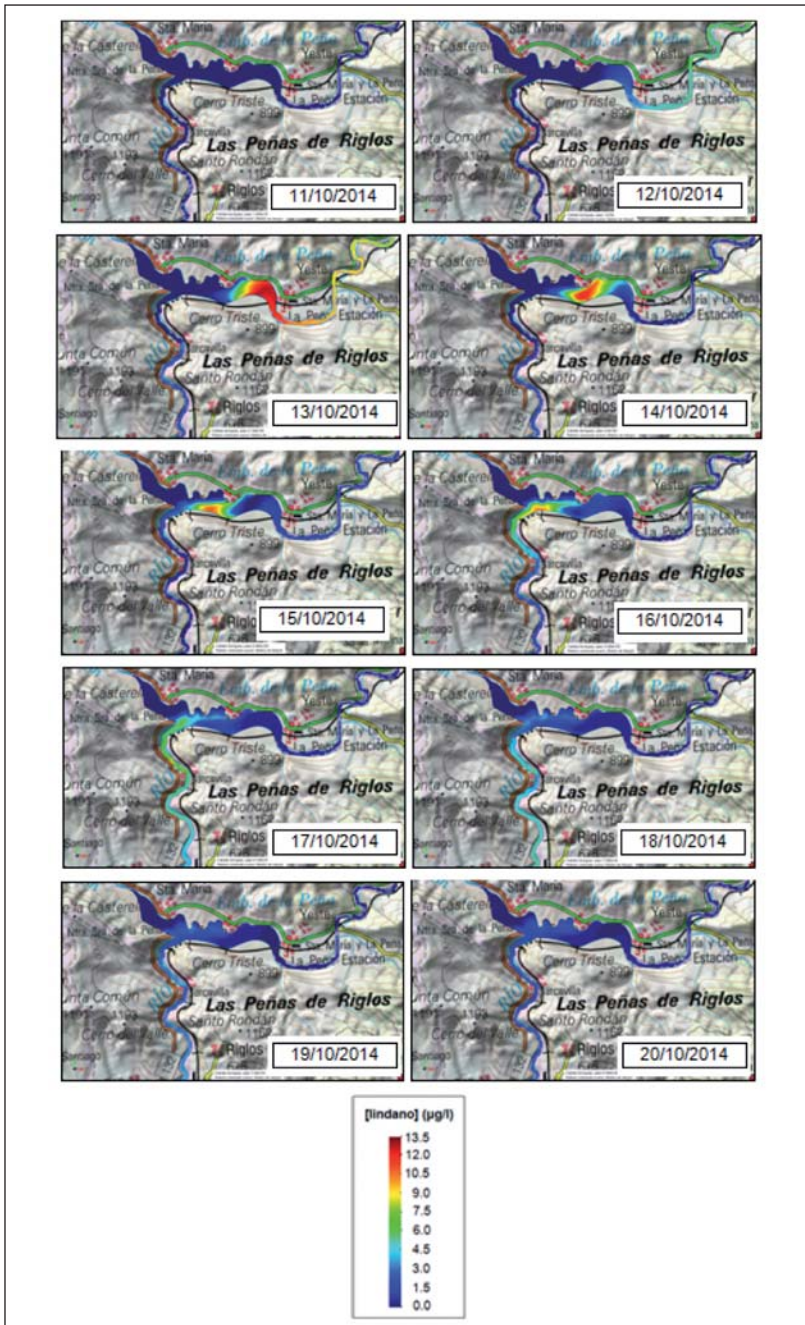


Fig. 6. Evolución temporal de la concentración de lindano en el embalse de La Peña.

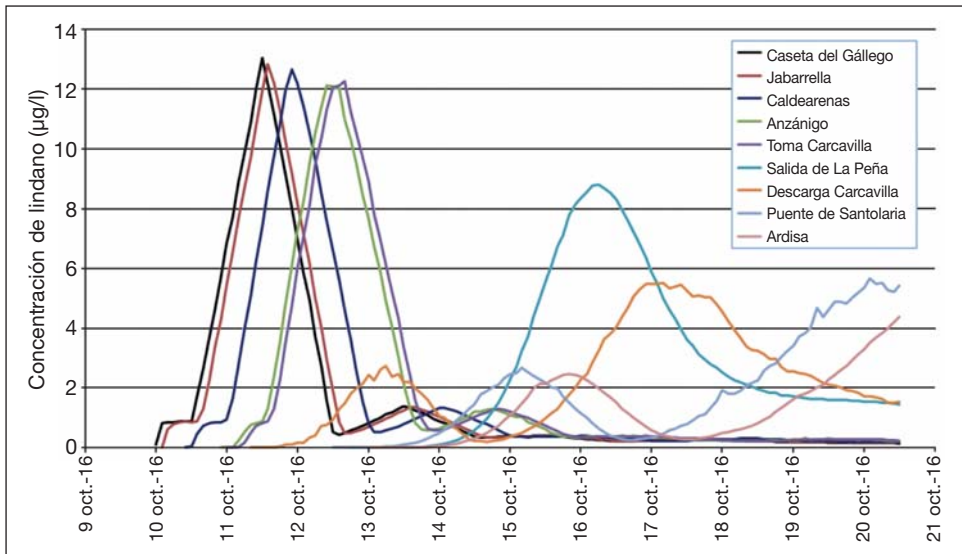


Fig. 7. Concentración de lindano en ubicaciones relevantes.

Además de salidas gráficas a través de imágenes y de vídeos, se ha extraído de la simulación toda la información numérica relevante, resumida en la figura 7.

La figura representa, para un conjunto de ubicaciones relevantes definidas en la figura 1, la evolución temporal de la concentración de lindano durante los días correspondientes a la simulación realizada.

El análisis gráfico y numérico de los resultados obtenidos confirma algunos efectos ya mencionados:

1. El efecto retardante del embalse de La Peña. Tal y como se observa en la figura, el “rodaje” del pico de caudal experimenta un claro frenado en este embalse, de manera que los picos de las gráficas de las ubicaciones aguas arriba del embalse quedan separados de las gráficas de las ubicaciones aguas abajo.
2. El efecto diluyente del embalse de La Peña. El embalse no solamente retarda el “rodaje” del pico de concentración, sino que lo atenúa. La mezcla del agua contaminada del río con el agua no contaminada del embalse consigue disminuir el valor máximo de concentración, como se observa claramente en la figura 7.

Se observa también en la figura 7 el efecto que produce el *by-pass* de Carcavilla. En la línea de la gráfica titulada “Descarga Carcavilla” se constata la aparición de un primer pico de contaminación correspondiente al agua turbinada que no ha pasado por el embalse, y un segundo pico de contaminación originado por el agua que sí ha pasado por el embalse. Este efecto tiene su origen en el hecho de que la captación de agua para la central está situada aguas arriba del embalse de La Peña, mientras que el turbinado y la descarga se realizan aguas abajo. Así, este *by-pass* provoca que una parte de las aguas contaminadas no pase por el embalse y la otra sí.

Esta partición del agua contaminada supone que donde antes había un único pulso de contaminación, ahora haya dos, que se desplazarán separadamente aguas abajo del río. La figura 8 muestra gráficamente la situación que se describe.

La figura muestra cómo la operación de la Central de Carcavilla hace que el episodio de contaminación aguas abajo del embalse de La Peña comience el 12 de octubre de 2014, con un primer pico de contaminación que alcanza unos $2,5 \mu\text{g/l}$ y que remite el día 14 (línea naranja en la figura 8).

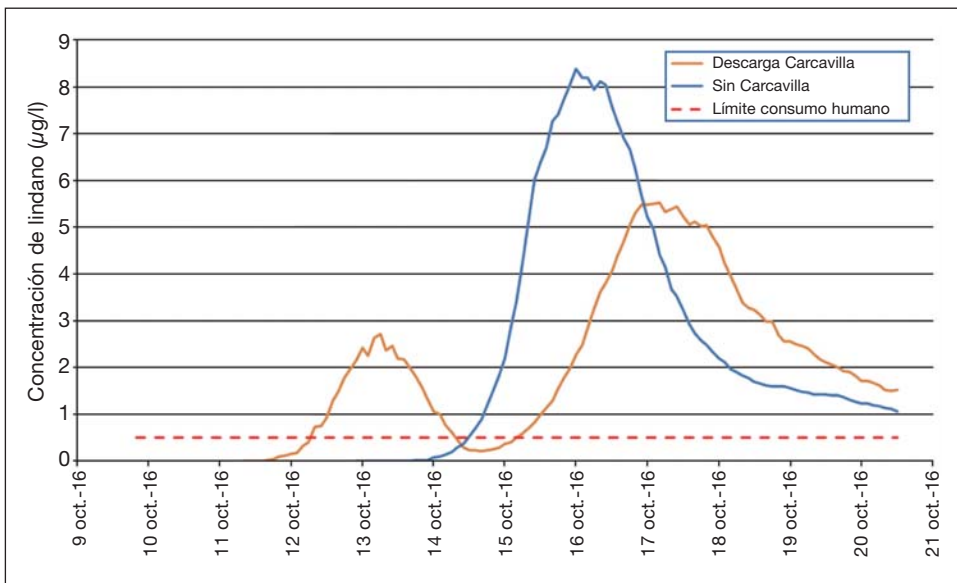


Fig. 8. Concentración de lindano después del embalse de La Peña, con o sin la operación de la central hidroeléctrica de Carcavilla.

Al día siguiente, llega el segundo pulso de contaminación, que se corresponde con el agua contaminada que ha atravesado el embalse de La Peña, alcanzándose un pico de unos $5,5 \mu\text{g/l}$ el día 17 de octubre. Así, todo el tramo aguas abajo del río Gállego ha estado contaminado desde el día 12 de octubre, con valores de concentración de lindano superiores al límite permitido para el consumo humano.

Para estudiar qué hubiera sucedido si la toma de la central hubiera estado cerrada durante el episodio de contaminación aguas arriba del embalse de La Peña, se ha realizado una segunda simulación hidrodinámica, anulando las condiciones de toma y descarga de Carcavilla.

Entre los resultados obtenidos, se ha extraído la concentración de lindano aguas abajo del embalse de La Peña, y se ha incluido en la figura 8 (línea azul de la gráfica). Se observa que, con la central de Carcavilla no operativa, el episodio de contaminación comienza en ese punto al mediodía del 14 de octubre de 2014, alcanzándose un pico de concentración algo superior a $8 \mu\text{g/l}$ el día 16 de octubre. Es decir, con la toma de la central de Carcavilla cerrada, la contaminación llegaría a ese punto, y, por tanto, a todo el tramo del río Gállego que comienza en él, unos 2 días después de lo que llega si la central está en funcionamiento.

Se deduce entonces que si se cerrara la toma de la central hidroeléctrica de Carcavilla cuando hubiera fuertes lluvias en Sabiñánigo, los tramos del río Gállego situados aguas abajo del embalse de La Peña podrían disponer de un mayor tiempo de reacción y un menor tiempo de suspensión de los diversos usos del agua que se dan en el río hasta su desembocadura (abastecimientos urbanos, regadíos).

CONCLUSIONES

Del proceso de elaboración del modelo de simulación hidrodinámica, de los resultados obtenidos y de su discusión, se extraen diversas conclusiones y recomendaciones, que se citan a continuación.

La simulación hidrodinámica mediante programas informáticos avanzados es una herramienta valiosa en el análisis de sistemas hídricos extensos y complejos como el que se ha estudiado. Se ha conseguido elaborar un

modelo suficientemente realista del tramo del río Gállego estudiado que, pese a las diversas aproximaciones realizadas, permite observar hechos interesantes al menos cualitativamente, dependiendo la calidad numérica de los resultados de la calidad de los datos utilizados en la implementación y en la calibración del modelo.

Se ha constatado una ausencia de mediciones reales de lindano en cantidad suficiente. Por ello, sería recomendable aumentar la frecuencia de los muestreos, especialmente durante los episodios de contaminación severa por lluvias (arrastre de contaminantes).

Gracias a los resultados del modelo, se ha constatado numéricamente los efectos retardante y diluyente del embalse de La Peña. El tránsito del agua contaminada por lindano por el embalse consigue retardar el comienzo de la contaminación en el tramo del río aguas abajo del embalse (efecto retardante). Del mismo modo, consigue disminuir el valor máximo de concentración (efecto diluyente).

Del análisis del efecto de la operación de la central hidroeléctrica de Carcavilla, se constata su papel de *by-pass* en cuanto a la propagación de la contaminación, puesto que el agua que turbinada la central no pasa por el embalse, por lo que no experimenta su efecto retardante y diluyente. Se recomienda estudiar la posibilidad de cerrar la toma de la central hidroeléctrica de Carcavilla durante los episodios de contaminación por fuertes lluvias en Sabiñánigo, para aumentar el tiempo de reacción aguas abajo del embalse de La Peña y acortar el tiempo de afección de la contaminación a los usos posteriores del río (abastecimientos urbanos, regadíos).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado con una Ayuda de Investigación del Instituto de Estudios Altoaragoneses en su convocatoria de 2015.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCALDE, D., T. ALONSO, R. ESPINOSA, J. FERNÁNDEZ y R. RODRÍGUEZ (2015). DNAPL distribution and transport in a fractured media. Hydrogeological constraints for the remediation of Bailín. *13th HCH and Pesticides Forum*. Zaragoza (Spain).

- BLADÉ, E., L. CEA, G. CORESTEIN, E. ESCOLANO, J. PUERTAS, E. VÁZQUEZ-CENDÓN, J. DOLZ y A. COLL (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30 (1): 1-10.
- CHE (2008). *Informe sobre la incidencia de un eventual vertido del vertedero de Bailín en la calidad del agua del río Gállego*. CHE. Zaragoza.
- CHE y GA (2007). *Plan hidrológico del río Gállego*. Versión 2 de diciembre de 2007. CHE / Gobierno de Aragón. Zaragoza.
- CORCHO, D., J. FERNÁNDEZ, L. LAPEROU y J. GUADAÑO (2015). Laboratory evaluation of mixed surfactants solutions to mobilise hexachlorocyclohexane (DNAPL) from Sardas landfill (Aragón, Spain). *13th HCH and Pesticides Forum*. Zaragoza (Spain).
- CORUJO, J. M. (2015) Security and health protocols for the dismantling works in the HCH Bailín landfill, Sabiñánigo, Spain. *13th HCH and Pesticides Forum*. Zaragoza (Spain).
- CORUJO, J. M., R. SAINZ, D. REVUELTO y J. FERNÁNDEZ (2015). Characterization and management of lindane-containing waste at an abandoned lindane production facility in Sabiñánigo, Huesca provincia (Spain). Primary emergency actions for organophosphate waste conditioning and ex situ management. *12th HCH and Pesticides Forum*. Kiev (Ukraine).
- CPNA (2015). *El lindano en la cuenca del río Gállego: propuestas de futuro*. Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón. Zaragoza.
- FERNÁNDEZ, J. (2015). General strategy for the HCH land fill pollution. The singular problem regarding de DNAPL presence. *13th HCH and Pesticides Forum*. Zaragoza (Spain).
- FERNÁNDEZ, J., M. Á. ARIOL y C. CACHO (2013). POP-contaminated sites from HCH production in Sabiñánigo, Spain. *Environmental Science and Pollution Research*, 20: 1937-1950.
- FERNÁNDEZ, J., J. M. CORUJO, J. M. CALEYA, D. REVUELTO, A. MIR, G. SAINZ y M. J. KAIFER (2015). Dismantling of the old lindane waste landfill of Bailín (Sabiñánigo, Huesca). *13th HCH and Pesticides Forum*. Zaragoza (Spain).
- GÓMEZ, J., J. FERNÁNDEZ, J. GUADAÑO y J. PÉREZ (2015). DNAPL detection, identification and characterization techniques and distribution in the Sardas landfill (Sabiñánigo, Spain). *13th HCH and Pesticides Forum*. Zaragoza (Spain).
- LACRUZ, B., J. A. CUCHÍ y J. FERNÁNDEZ (2015). Waste shipment in Sabiñánigo (Huesca, Spain) and its effect on the Gállego River contamination during late 2014. *13th HCH and Pesticides Forum*. Zaragoza (Spain).
- MICHAVILA, M., R. LÓPEZ-FLORES y J. A. CUCHÍ (2014). Estado trófico y calidad ecológica del río Gállego a su paso por la provincia de Huesca. *Lucas Mallada*, 16: 135-167.
- MIR, A. (2015). Environmental monitoring of the dismantling Works in the HCH Bailín landfill, Sabiñánigo, Spain. *13th HCH and Pesticides Forum*. Zaragoza (Spain).

- PELEGRÍN, C., J. ASÍN, B. LACRUZ y J. FERNÁNDEZ (2015). A statistic windspeed prediction model for the dismantlement of the HCH landfill in Bailín (Sabiñánigo, Huesca, Spain). *13th HCH and Pesticides Forum*. Zaragoza (Spain).
- PÉREZ, J., J. GÓMEZ, J. GUADAÑO, J. FERNÁNDEZ y J. SUSO (2015). Flow simulation modeling of the groundwater interchange between quaternary aquifer and Sabiñánigo reservoir. *13th HCH and Pesticides Forum*. Zaragoza (Spain).
- SANTOLARIA, Z., T. ARRUEBO, A. PARDO, A. BARTOLOMÉ, J. M. MATESANZ, C. RODRÍGUEZ, J. CAIXACH, F. J. LANAJA y J. S. URIETA (2015). Lindane and other organic pollutants record in the Pyrenean Sabocos tarn water mass. *13th HCH and Pesticides Forum*. Zaragoza (Spain).