Sobre un modelo numérico integral para la hidrología extrema de cuencas reguladas

Padilla, F.[a1], Hernández, J-H.[b1] y Vellando, P-R.[a2]

[a]Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidade da Coruña, Campus de Elviña s/n. E-mail: [a1]francisco.padilla@udc.es, [a2]pablo.rodriguez-vellando@udc.es.
[b]Ingeniería Geomática e Hidráulica, Universidad de Guanajuato, Av. Juárez 77, México. E-mail: [b1]horandez@gmail.com

Línea temática B | Hidrología, usos y gestión del agua.

RESUMEN

Se ha ultimado el desarrollo de un modelo numérico hidrodinámico subterráneo y superficial capaz de evaluar las variables físicas relativas a todos los recursos hídricos de una cuenca hidrográfica (continental y/o costera) en su interacción con los distintos componentes del ciclo hidrológico para los usos del agua y ciertos acontecimientos hidrológicos extremos. Dicho modelo FreshWaterSheds se ha fundamentado en el método de los elementos finitos y en desarrollos implementados por los miembros integrantes del equipo de investigación, y en parte verificados e integrados entre sí en una Interfaz informática amigable conectada a un SIG. Se ha realizado la validación y la verificación del modelo con datos reales, lo suficientemente complejos, que permiten y avalan su aplicación a la resolución de problemas prácticos medioambientales, de ingeniería civil y de la gestión de todos los recursos hídricos de cuencas hidrológicas fuertemente reguladas y con características hidrológicas extremas.
Los trabajos realizados en este proyecto suponen pues la aplicación y desarrollo de un modelo numérico dotado de una interfaz informática amigable, a partir de la medición y el acceso a una gran variedad de datos hidrogeológicos y geográficos de relevancia para este tipo de estudios hidrológicos, los que permiten resaltar la fuerte interacción espacial y temporal entre las aguas subterráneas y superficiales (en rocas y sedimentos de geología compleja, ríos y laderas de elevadas pendientes, acuíferos, suelos, vegetación, así como para derivaciones, galerías filtrantes, bombeos, presas, embalses, lagos de gran calado, o acontecimientos como inundaciones, sequías, etc.), de manera a poder evaluar local y globalmente todos los componentes del ciclo hidrológico (mediante niveles freáticos, caudales, velocidades del agua, hidrogramas, calados, balances hidrológicos, etc.), a partir de la climatología, los elementos de regulación y los usos del agua presentes y/o futuros.
En este sentido se presenta una aplicación al estudio de la Cuenca del río Mero, hasta la confluencia aguas abajo de la presa del Embalse de Cecebre (de 250 km2), con el fin de considerar aquellos elementos de regulación y usos del agua especialmente afectados por la hidrografía cercana a la Mina de Meirama (de elevadas pendientes y con más de 200 metros de profundidad) y por los Embalses de Beche y de Cecebre, los cuales son especialmente relevantes por regular buena parte de las demandas hídricas de una amplia región como es La Coruña y varios de sus municipios colindantes.
Es por tanto que se han utilizado en la Cuenca del río Mero las variables y los parámetros hidrológicos suficientes como para cumplir con los objetivos de la aplicación, calibración y validación del modelo numérico desarrollado para el análisis de la evolución de todos los recursos hídricos afectados, principalmente entre otros, por los usos del agua, la geología, la vegetación, la climatología, el llenado del hueco de la mina de lignitos de Meirama y las operaciones de regulación del Embalse de Cecebre, con el fin de estar en medida de mejorar la futura gestión y la planificación de los recursos hídricos en la región.

INTRODUCCIÓN

Los cuerpos de agua superficial como lagos, humedales, estuarios y ríos están por lo general hidráulicamente conectados con el agua subterránea, y su interacción determina los procesos de recarga y descarga, así como la cantidad y la calidad de ambos flujos de agua. Winter et al. (1998), Sophocleus (2002), Scanlon et al., (2002), así como de Vries and Simmers (2002) dan una visión detallada de las interacciones entre los flujos de agua subterránea y superficial en relación con factores climáticos, de relieve del terreno, geológicos y bióticos.

Para entender mejor los procesos de interacción entre las aguas subterráneas y superficiales, es necesario implementar modelos numéricos distribuidos que integren ambos flujos. En este ámbito, el modelo numérico *FreshWaterSheds* ha sido desarrollado por el Grupo de Enxeñaría da Auga e do Medio Ambiente (GEAMA) de la Universidade da Coruña (Padilla y Cruz-Sanjulián, 1997; Padilla et al., 2008; Hernández, 2011; Hernández el al., 2012). El modelo es gestionado mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) y una Interfaz para aplicarlo en este caso a la hidrología de la inundación de la mina de Meirama teniendo en cuenta la cuenca del río Mero y los embalses de Beche y Cecebre.

Una vez dio inicio el llenado de la mina de Meirama el régimen de caudales del río Barcés fue modificado, lo que repercutió en los recursos de agua subterránea y superficial, y en los usos de la cuenca del río Mero. A partir de estudios contratados por la empresa Lignitos de Meirama S.A. (LIMEISA), se determinaron las alternativas hidrológicas de llenado desde marzo de 2008 para las demandas de caudal ecológico requeridas por el río Barcés aguas abajo del hueco minero. Sin embargo, las estrategias adoptadas para la inundación de la mina han sufrido una serie de eventualidades no previstas, tal es el caso de la mala calidad del agua del arroyo Pereira y su posterior derivación al interior del hueco minero, el 3 de octubre de 2008. Con el fin de evitar la trascendencia del problema al embalse de Cecebre y al río Mero en general, ello ha conllevado una modificación en la regulación de las aguas y un cambio en el régimen previsto de caudales del río Barcés.

El embalse de Cecebre, fuente principal de agua potable de A Coruña, justifica cualquier estudio de la evolución temporal del flujo de las aguas subterráneas y superficiales tanto de la cuenca del río Mero como de la de su afluente el río Barcés. En este contexto, las alternativas de inundación de la excavación minera de Meirama como lago, suponen modificar, entre otras cosas, el régimen hídrico de la cuenca del río Barcés y su confluencia con el río Mero en el embalse de Cecebre. Dicha rehabilitación como lago implica además otras preocupaciones medioambientales ya evaluadas, en parte, por el grupo GEAMA (Delgado et al., 2008 a, b; Juncosa et al., 2008).

La aplicación práctica del código *FreshWaterSheds* a la cuenca del río Mero, con énfasis especial en la mina de Meirama y el embalse de Cecebre, tiene como objetivos principales: calibrar la hidrología de las aguas subterráneas y superficiales durante un periodo conocido; modelizar la evolución reciente del régimen hídrico regional durante el llenado como lago de la mina de Meirama, teniendo en cuenta sus elevadas pendientes, los diferentes usos del agua y las operaciones de regulación del embalse de Cecebre; y por otro lado, analizar la evolución de todos los componentes del ciclo hidrológico durante el periodo de simulación.

IMPLEMENTACIONES DEL MODELO

El código utilizado en la modelización de los recursos hídricos, *FreshWaterSheds*, es un código de elementos finitos en dos dimensiones 2D horizontales para flujo regional superficial y subterráneo de agua dulce y/o salada a través de diversos tipos de sistemas de cuencas hidrográficas, desarrollado con una aproximación numérica implícita (Euleriana) temporalmente centrada (Crank–Nicholson) y espacialmente centrada (Galerkin). En particular, elementos triangulares de tres nodos permiten la integración analítica correspondiente a la formulación numérica para el régimen permanente y transitorio. El algoritmo iterativo previamente condicionado GMRES (Saad and Schultz, 1986) provee la solución del sistema utilizando una cantidad reducida de memoria de cálculo y un procesamiento simple de la malla numérica.

El código *FreshWaterSheds* para aplicación en cuencas continentales y costeras acopla en una hidrología regional los flujos de agua dulce y salada en medios porosos saturados a través de una interfase inmiscible, y una aproximación de onda difusiva para el flujo superficial. Para más detalles sobre las ecuaciones que gobiernan los acuíferos regionales continental y costero, así como el medio superficial, la interacción subterránea – superficial, los usos del agua y los principales elementos de regulación se puede consultar Padilla y Cruz-Sanjulián, 1997; Padilla et al., 2008; Hernández et al., 2012; Padilla et al., 2015; Padilla et al., 2016.

No obstante las aplicaciones actuales han permitido desarrollar específicamente nuevos elementos de regulación. Se trata pues de la implantación efectiva de compuertas y aliviaderos de presas, así como de galerías filtrantes y/o túneles drenantes de distribución de aguas (Figura 1).

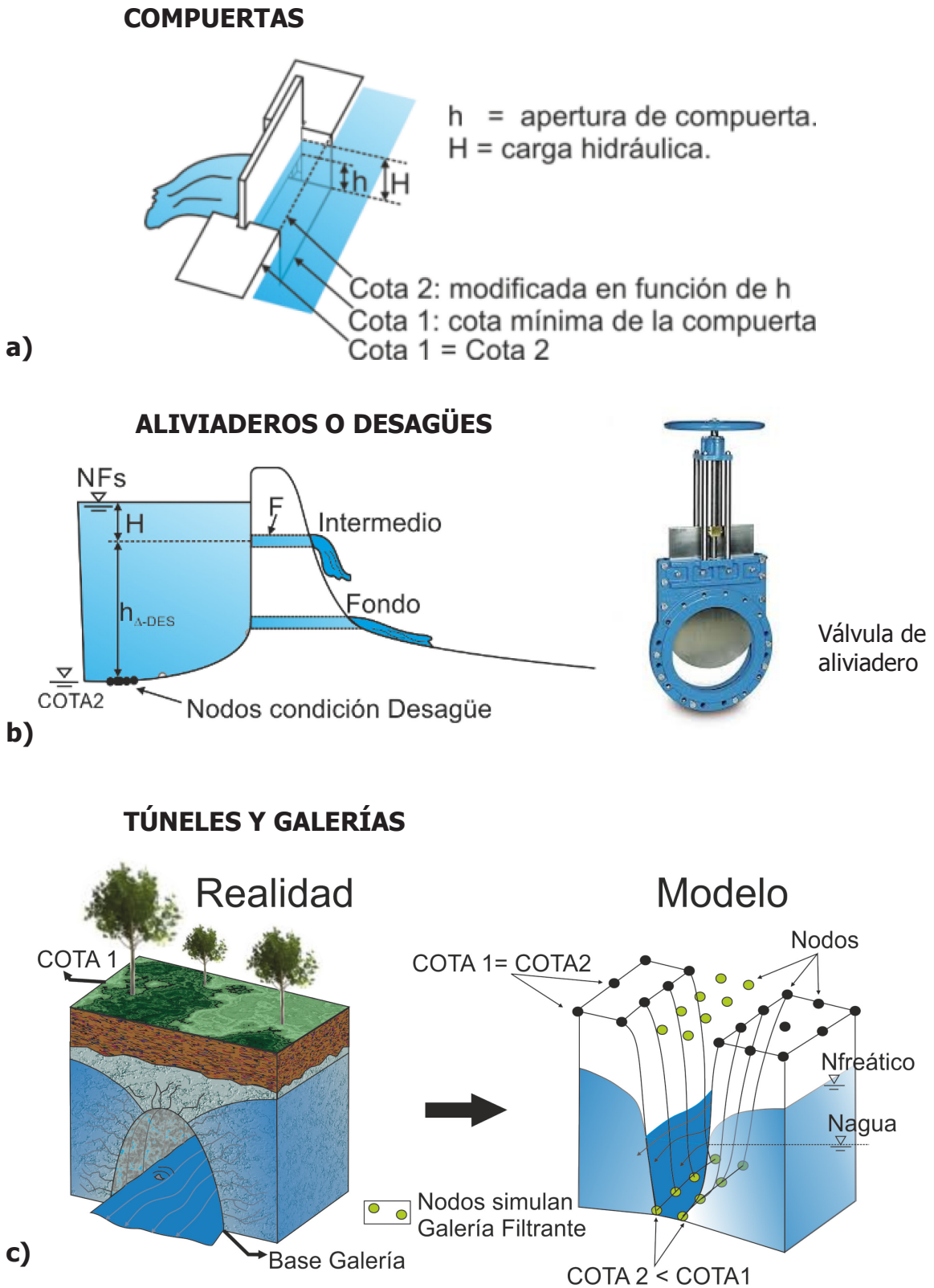

Figura 1 | Elementos principales de regulación a) Compuertas, b) Aliviaderos, c) Galerías.

Las compuertas de descarga de agua en presas son de diversos tipos (Figura 1a). El tipo de compuertas más simple es el de elevación. Este tipo de compuertas modifica, por elevación y descenso, la cota del umbral del vertedero de pared delgada correspondiente, cuya sección suele ser rectangular. La forma de esta compuerta debe estar definida por la malla numérica del modelo y es tratada mediante modificación en curso de simulación de la cota/elevación de los nudos de la sección de la compuerta tal que indique las operaciones de regulación de la presa. La descargas y los flujos de agua que se produzcan formarán parte de la solución del sistema. Sin embargo hay otro tipo de compuertas muy habitual, como las compuertas de guillotina. Estas compuertas proceden a cortar el espesor saturado por debajo de la lámina de agua libre, y hasta el umbral del vertedero, dejando pues una abertura sumergida por donde descarga el agua. La abertura de la compuerta condicionará la descarga de agua, en función de las otras variables hidráulicas que la determinan, y ello en curso de simulación. Las funciones de equivalencia hidráulica entre ambos tipos de compuertas, de elevación y de guillotina, han sido implementadas en *FreshWaterSheds*, con el fin de que las aberturas correspondientes a las operaciones de regulación de dicho tipo de compuertas sean suficientes para considerar las descargas calculadas en la presa durante la simulación.

Los aliviaderos o desagües de las presas, son otro instrumento de regulación de la descarga de un embalse (Figura 1b). Normalmente la descarga correspondiente es conducida aguas abajo de la presa mediante tuberías ciegas provistas de válvulas, cuyas aberturas condicionarán los caudales de descarga. Las curvas de gastos de dichos aliviaderos, para el tipo de válvulas en uso, han sido implementados en *FreshWaterSheds* para las aberturas correspondientes a las operaciones de regulación.

Los túneles o galerías filtrantes son instrumentos de regulación y de distribución de aguas que afectan esencialmente a los flujos de aguas subterráneas (Figura 1c). Con el fin de tratar adecuadamente este tipo de elementos de regulación en su interacción con las aguas subterráneas, el modelo *FreshWaterSheds*, procede mediante la creación y modificación de una nueva topografía secundaria, que en función del grado de filtración de la obra (para un coeficiente de filtración entre 0 y 1), ubique la cota del túnel o galería en cada nudo de la malla entre su situación real y el nivel freático en curso de simulación. El resultado de la interacción será pues objeto de calibración, según el grado de conocimiento del revestimiento de la obra, en su caso.

Así mismo, las pendientes pronunciadas de la topografía han sido también objeto de un tratamiento hidrológico especial. Se ha determinado que las pendientes elevadas del terreno puede tener una influencia significativa en el poder de transferencia y de laminación de las aguas superficiales, tanto como escorrentía directa y/o escurrimiento sobre la superficie del suelo, como en cuerpos de agua superficial como los ríos y los lagos. Si la pendiente del terreno es significativamente más elevada, se ha implementado la modificación del coeficiente X, el cual viene definiendo principalmente el coeficiente de transferencia del agua superficial (Padilla et al., 2016), mediante $X = X \cdot \cos \theta/2$, donde θ es la pendiente del terreno. Los resultados (calados, velocidades y caudales de agua superficial) se han visto notablemente mejorados, especialmente en terrenos de morfología más abrupta.

El desarrollo reciente de estas nuevas metodologías numéricas hace posible implementar el código *FreshWaterSheds* con el fin de mejorar la evaluación del escurrimiento, la red de drenaje activa, el flujo subálveo o hipodérmico, las recargas y descargas en zonas puntuales y superficiales difusas, el espesor y las velocidades del flujo de agua superficial y subterránea, los balances de agua, las inundaciones, el llenado de cuerpos de agua superficial de gran calado, la hidrografía de elevadas pendientes, así como los usos de agua (derivaciones, bombeos, operaciones de presas, compuertas, aliviaderos, riegos, distribución de aguas, galerías, etc.). Asimismo se evalúan distintos componentes del ciclo hidrológico, como la precipitación, la evaporación y la transpiración real para distinta vegetación y tipos de suelo (Hernández et al., 2012)

Hoy en día la gestión de los modelos numéricos distribuidos por elementos finitos para aplicación en hidrología se sustenta, en gran medida, en la creación de la malla numérica de cálculo y en los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Los SIG son un elemento fundamental dadas las posibilidades que ofrecen para representar, analizar y transformar información con una componente geográfica, además de almacenar, editar, gestionar y tomar decisiones con la información. Los fundamentos de los SIG han sido detallados ampliamente por diversos autores (De By et al., 2001; Longley et al., (2005); Moreno et al., 2007).

Entonces, las entidades de dibujo (puntos, polígonos y poli-líneas) y los modelos de representación de superficies continuas (en formato raster o TIN) son empleados como elementos visuales para gestionar la ubicación y distribución de todos

los parámetros y variables hidrológicas utilizadas en *FreshWaterSheds*. A estas entidades de dibujo también se les vincula una base de registros de campo, medidos o adquiridos, lo que define su comportamiento transitorio.

APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO MERO

La cuenca del río Mero, aguas arriba de la presa del embalse de Cecebre, tiene una extensión de 246.5 km^2 y se sitúa entre los términos municipales de Cambre, Cerceda, Carral y Abegondo, A Coruña, España. La corta de Meirama se sitúa en la cabecera de la cuenca del río Barcés; el flujo superficial de esta cuenca, producto del exceso de agua subterránea y del escurrimiento, es drenado por el río Barcés hasta su confluencia en el embalse de Cecebre (Figura 2). El río Barcés es un afluente del río Mero por su margen izquierda, y en la confluencia de ambos ríos, Mero y Barcés, se localiza la presa del embalse de Cecebre, la cual regula el suministro de agua potable de A Coruña y sus alrededores. Desde allí el agua discurre por el propio cauce del río Mero hasta la planta de tratamiento de agua potable de La Telva, propiedad de la Empresa Municipal de Aguas de La Coruña (EMALCSA).

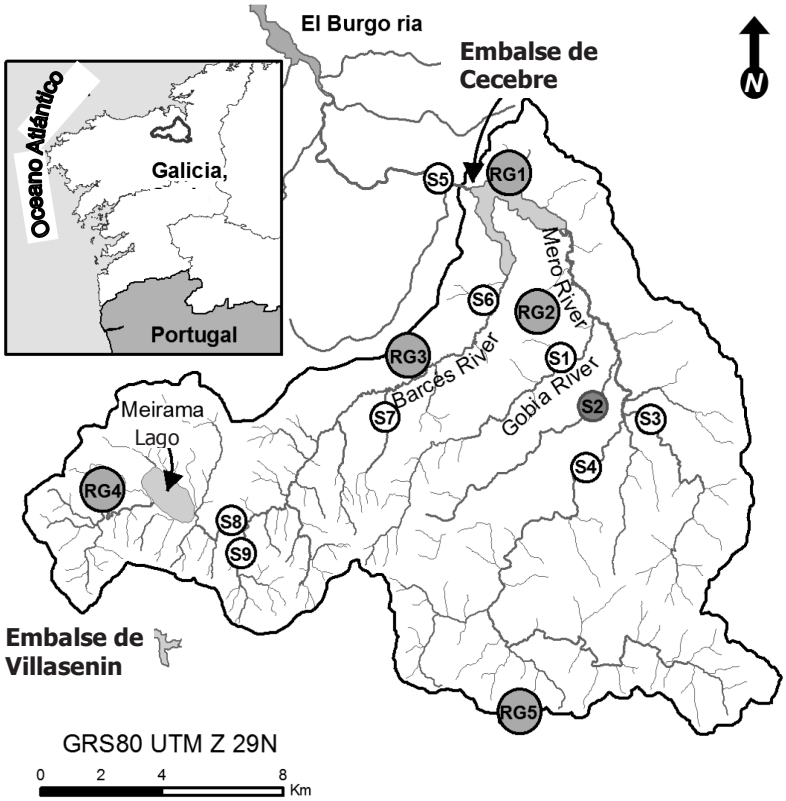

Figura 2 | Cuenca del Río Mero.

Los elementos que representan la geología, la hidrología, la fisiografía, las diferentes coberturas vegetales y los suelos, en conjunto determinan las propiedades hidrológicas necesarias a la simulación del modelo del río Mero (Figura 3). Las condiciones de simulación se determinan mediante las intensidades de la precipitación en la cuenca del río Mero, el caudal de agua en los ríos, la ubicación de los usos del agua, el caudal extraído en pozos de bombeo, el agua utilizada para riego de parcelas, el agua que transpiran los arboles desde el subsuelo, la evaporación de agua desde las masas de agua, los caudales de retorno de zonas urbanas, las operaciones de la presa del embalse de Cecebre, la gestión y la distribución de las aguas en el entorno de la mina de Meirama. Algunos de estos componentes, como las intensidades de la precipitación, son imprescindibles, y en la medida de lo posible son medidos cuando no hay registros disponibles para su adquisición (Figura 4).

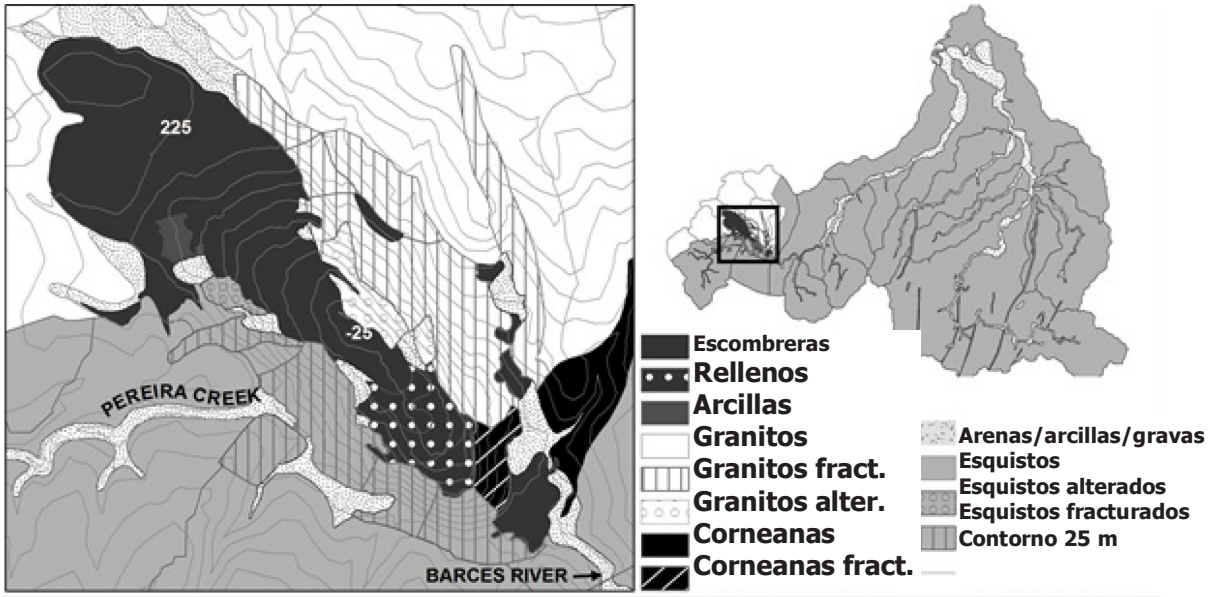

Figura 3 | Geología de la Cuenca del Río Mero

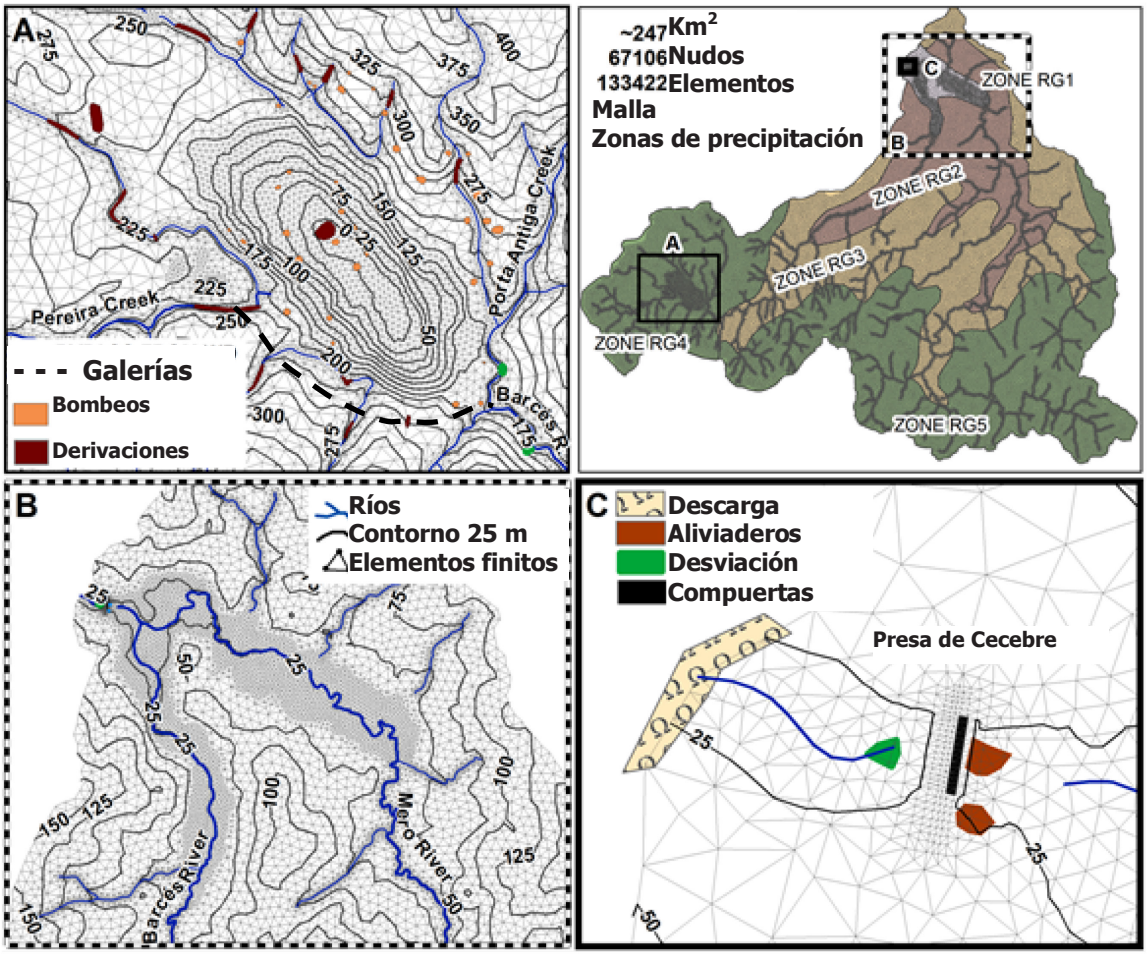

Figura 4 | Malla de elementos finitos y Zonas de precipitación en la Cuenca del Rio Mero. Gestión del agua y condiciones de contorno en la Mina de Meirama (A) y el Embalse de Cecebre (B, C).

En el desarrollo del modelo del río Mero se ha implementado una malla por elementos finitos triangulares de tres nodos (Figura 4), generada con el programa SMS 10, mientras que la cuenca y los rasgos hidrológicos se delimitan con SIG. Las zonas con mayor densidad de nodos en la malla se delimitan a través de ficheros de formas (shapefiles), estas zonas se corresponden con ríos y masas de agua como embalses y lagos. Por su parte, el modelo digital del terreno utilizado es previamente reacondicionado con herramientas de SIG.

La malla mostrada en la Figura 4 está compuesta de 67106 nodos y 133422 elementos triangulares, con una mayor densidad de nodos en las zonas susceptibles de presentar interacción de flujo superficial y subterráneo con el objeto de aumentar la precisión de las evaluaciones realizadas por el código *FreshWaterSheds*.

El túnel o galería filtrante de la Mina de Meirama desvía y conduce el agua derivada en el arroyo Pereira hacia aguas abajo del río Barcés, en interacción con el agua subterránea, con el fin de mantener primordialmente el caudal ecológico durante las operaciones de explotación y posterior llenado como lago. La interacción del túnel con las aguas subterráneas ha sido pues objeto de calibración.

Los vertidos del embalse de Cecebre son gestionados mediante las operaciones de desembalse de la presa. Por una parte, hay que considerar los desagües de las compuertas (5 compuertas de 6 metros de longitud), las cuales guillotinan la lámina de agua libre por encima de la cota de 31.5 metros, y ello hasta una cota máxima de 36 metros, por encima de la cual el agua vertería por coronación. Igualmente, y por otra parte, los vertidos del embalse de Cecebre se gestionan a través de un aliviadero intermedio (localizado a la cota de 27 metros), así como de dos aliviaderos de fondo (localizados a la cota de 19 metros). Todos los aliviaderos disponen de válvulas de guillotina que seccionan sus respectivas tuberías circulares de desagüe a partir de una sección máxima de 0.9 metros de diámetro.

La gestión de los desagües de la presa del embalse de Cecebre se realiza en el modelo *FreshWaterSheds*, en primer lugar, mediante la ubicación en la malla de elementos finitos del modelo de las compuertas y de los aliviaderos intermedio y de fondo. Las compuertas desaguan en su propia localización, mientras que los aliviaderos desaguan a pie de presa a través de las respectivas tuberías de sección circular (Figura 4). En segundo lugar, todas las operaciones de los elementos de desagüe (compuertas, por un lado, y aliviaderos, por otro) son introducidos en el modelo a partir de las aberturas de las mencionadas operaciones, para ser gestionadas interiormente en base a los desagües que se producirán, dependiendo del nivel de agua libre en el embalse, objeto de evaluación en cada instante por el modelo de simulación. La gestión apropiada de los caudales desaguados en cada momento por la presa, a través de los diferentes elementos de regulación (compuertas y aliviaderos), requiere de las aberturas de la operaciones realizadas y del ajuste hidráulico de las curvas de gastos de dichos elementos (suministrado en este caso por los actuales operadores de la presa, EMALCSA, Figura 5).

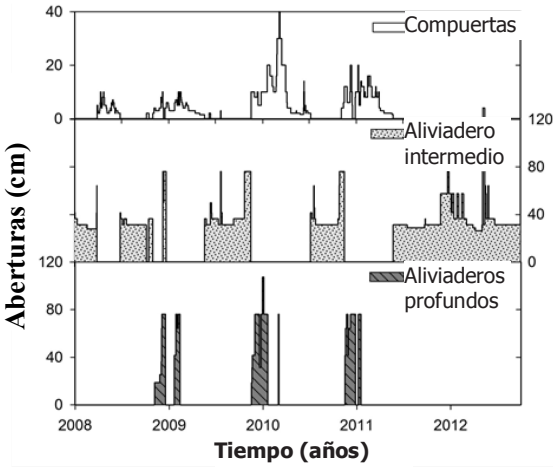

Figura 5 | Regulación en el Embalse de Cecebre. Aberturas de Compuertas y de Aliviaderos Intermedio y Profundos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los caudales superficiales registrados durante las campañas de aforo se comparan con los flujos de agua superficial de las secciones transversales del modelo de simulación (Figura 6). En las secciones de aforo, el porcentaje de error medio entre el caudal simulado y medido es en cualquier caso inferior al 10%.

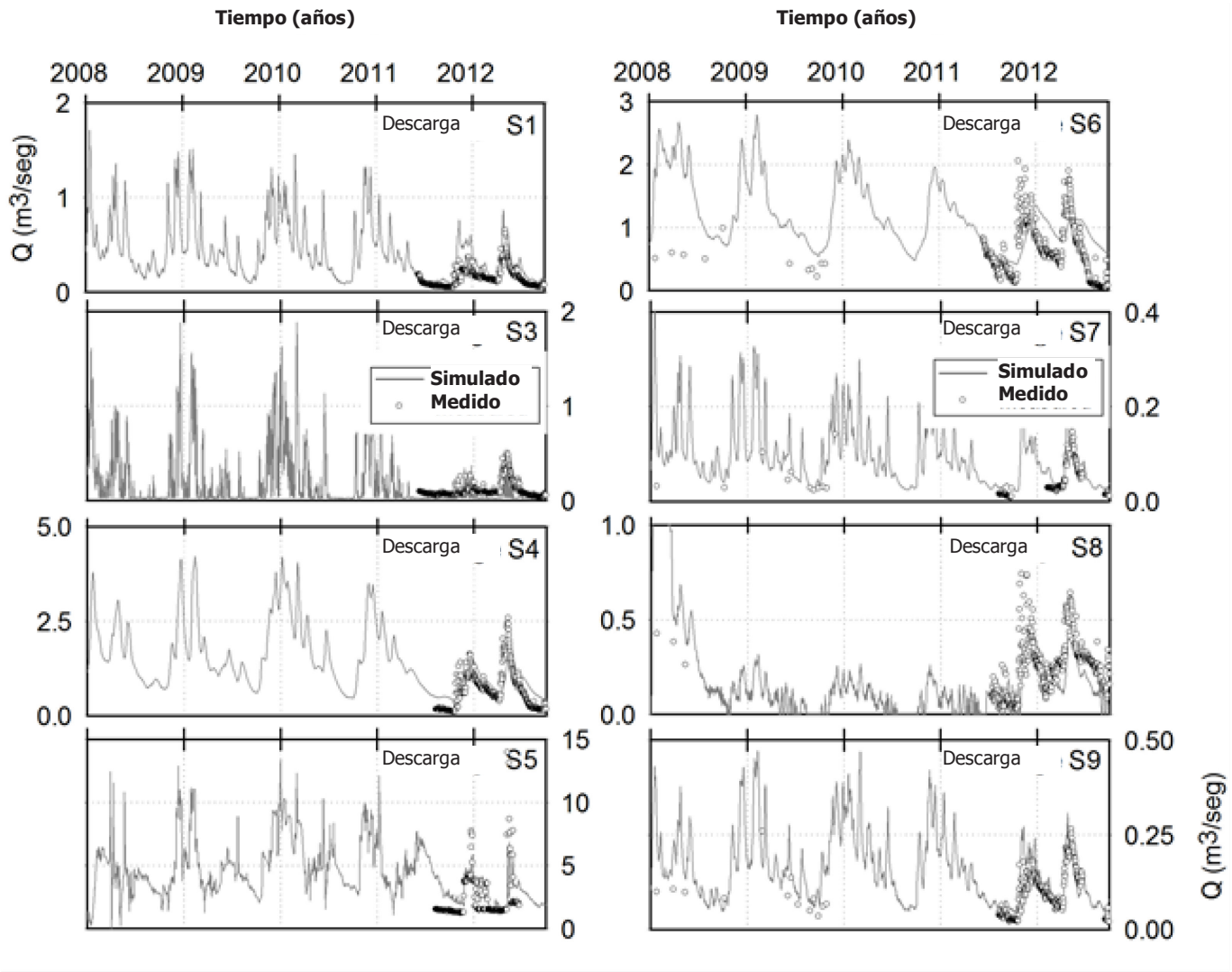

Figura 6 | Algunos de los caudales de descarga superficial medidos y simulados durante el periodo de simulación.

Se han realizado igualmente las comparaciones de los niveles freáticos, en piezómetros y pozos de bombeo, con la evolución temporal puntual de los resultados del modelo, lo que sirve para establecer, en cierta medida, si es aceptable la simulación de la evolución de las aguas subterráneas.

La evolución de la cota alcanzada en el lago, durante el periodo de simulación, tiene un interés especial (Figura 7). El llenado del hueco minero dio inicio el 18 de Marzo de 2008, y a partir de entonces se cancelaron buena parte de los bombeos y drenajes perimetrales de la excavación. Esta circunstancia ha permitido calibrar ciertas propiedades hidráulicas de los materiales más estrechamente relacionados con la mina de Meirama como la escombrera interior, los rellenos, la escollera, los materiales terciarios, y los granitos alterados y fracturados.

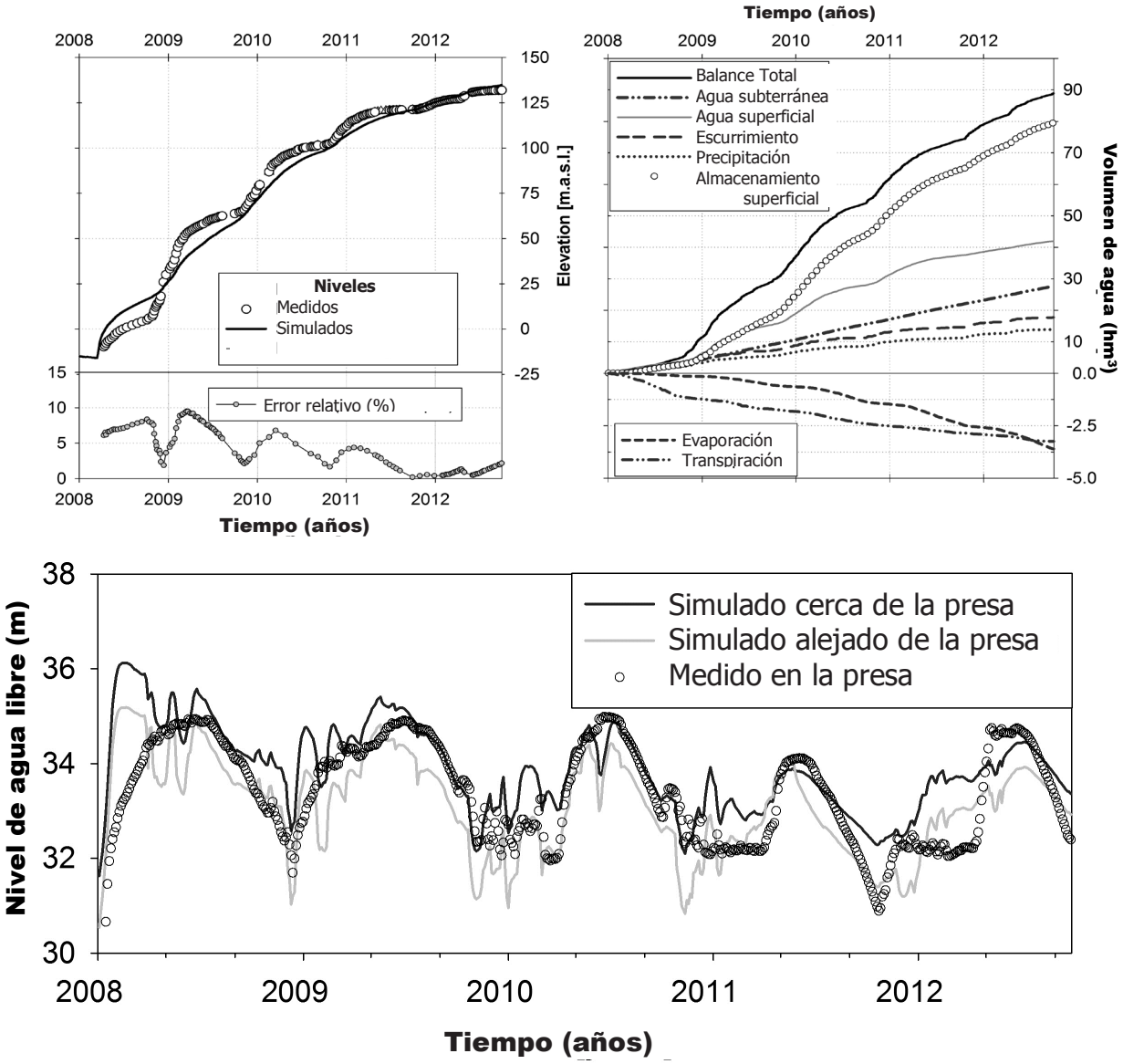

Figura 7 | Arriba: (izquierda) Inundación observada y simulada, y (derecha) Balance de volúmenes acumulados, en la zona del lago correspondiente a la excavación de la Mina de Meirama. Abajo: Evolución de niveles de agua observados y simulados en el Embalse de Cecebre.

La comparación entre los niveles simulados y registrados en el lago parece ajustarse de forma bastante aceptable, aunque en el análisis detallado de los resultados se observan ciertas diferencias durante los periodos octubre-marzo (periodo húmedo) y abril-septiembre (periodo estival).

El balance hidrológico de la mina de Meirama es analizado a partir del balance zonal de las componentes de evaporación, transpiración y usos de agua en el sector de la mina, así como del balance en las secciones transversales del modelo que circundan el hueco minero. El balance se inicia el 1 de enero de 2008, y finaliza el 30 de septiembre de 2012.

Este análisis permite conocer la evolución de los volúmenes que atraviesan el conjunto de secciones transversales ubicadas alrededor del hueco de la mina, es decir, los volúmenes subterráneo, superficial y de escurrimiento, junto con otras entradas y pérdidas de agua, como la precipitación, la evaporación y la transpiración, sobre y desde la superficie interior delimitada por estas secciones transversales (3.68 Km^2), cerrando así el balance simulado durante este periodo de análisis en el hueco minero, tal y como se muestra en la Figura 7.

Las operaciones de regulación realizadas en el embalse de Cecebre condicionarán el régimen hidrológico y la disponibilidad del agua, durante el periodo de simulación comprendido entre 2008 y 2012, aguas arriba y abajo de la presa. Se realiza pues una comparación entre los niveles observados y simulados en las zonas de la cola y de descarga del embalse (Figura 7). Pese a las diferencias encontradas, las comparaciones parecen bastante aceptables durante los casi cinco años de simulación.

Igualmente se representan las velocidades superficiales calculadas en las inmediaciones de la presa del embalse de Cecebre, las que pueden ser analizadas en función de las operaciones de desembalse realizadas. En la Figura 8 se representan dichas velocidades para una fecha concreta del periodo de simulación.

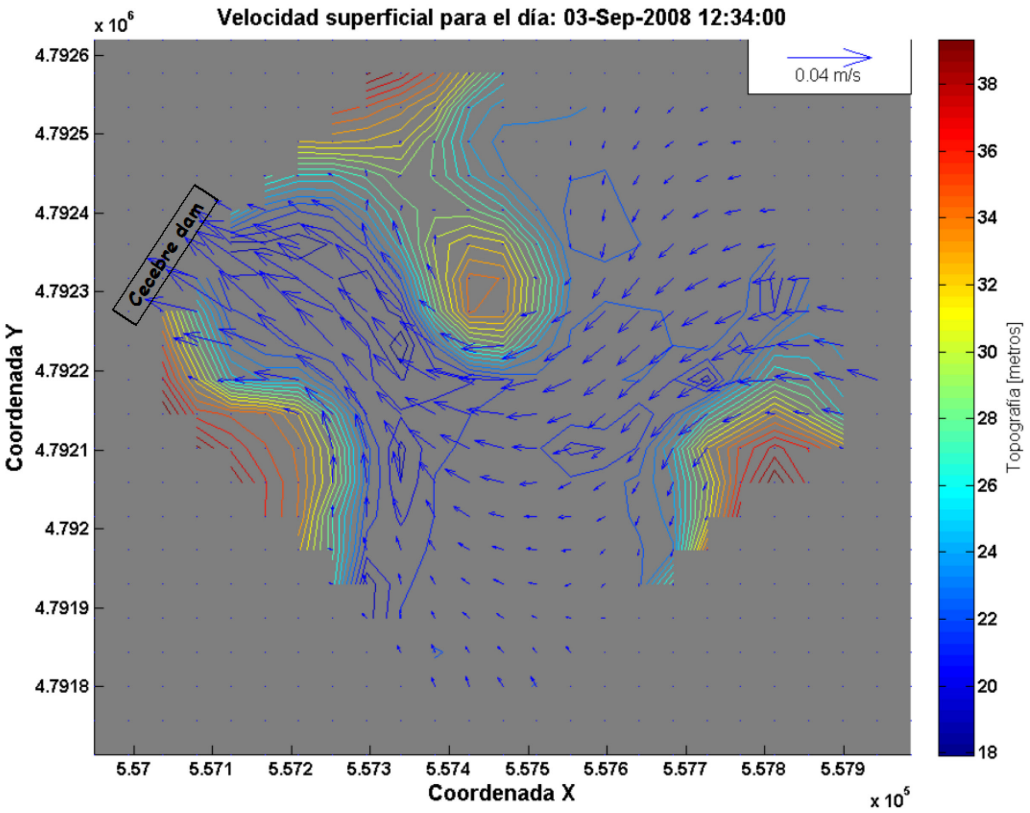

Figura 8 | Campo de velocidades en las inmediaciones de la Presa de Cecebre el 3 de septiembre de 2008.

El análisis de los resultados a escala global en toda la cuenca del río Mero, hasta aguas abajo de la presa de Cecebre, se puede realizar durante el periodo de simulación para algunas de las variables hidrológicas más relevantes. Por un lado, se representan los niveles de agua superficial y subterránea en Enero de 2008 en la Cuenca del Río Mero (Figura 9). Cabe destacar que la Mina de Meirama se encuentra todavía en explotación y que existe un periodo de extensa sequía en la zona, con lo que la hidrología de la región en el resultado de la climatología, los usos del agua y las operaciones de regulación existentes en la cuenca.

Por otra parte, se representan los niveles freáticos de las aguas superficiales y subterráneas en Septiembre de 2012 (Figura 10). Cabe destacar igualmente que el lago correspondiente a la mina de Meirama se encuentra en estado avanzado de llenado, y la hidrología de la cuenca y el embalse de Cecebre en esta época también están sufriendo los rigores del periodo estival.

Por lo tanto, los parámetros hidrológicos calibrados durante el periodo 2008-2012 parecen responder a la variabilidad hidrológica de la cuenca y pueden considerarse como aceptables.

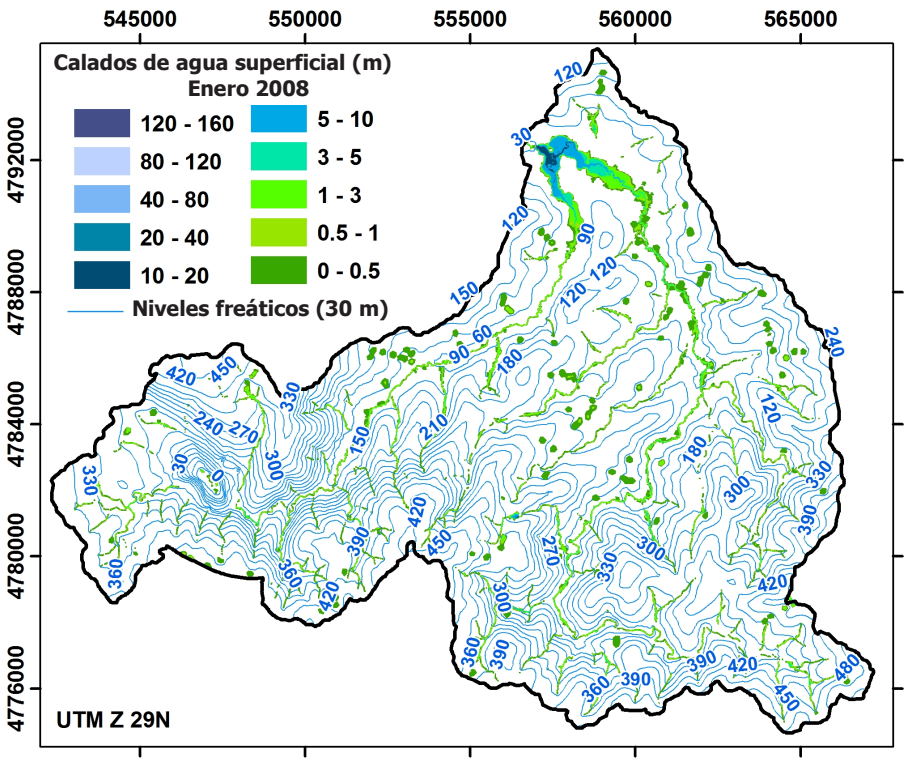

Figura 9 | Simulación de niveles de agua superficial y subterránea en Enero de 2008 en la Cuenca del Río Mero.

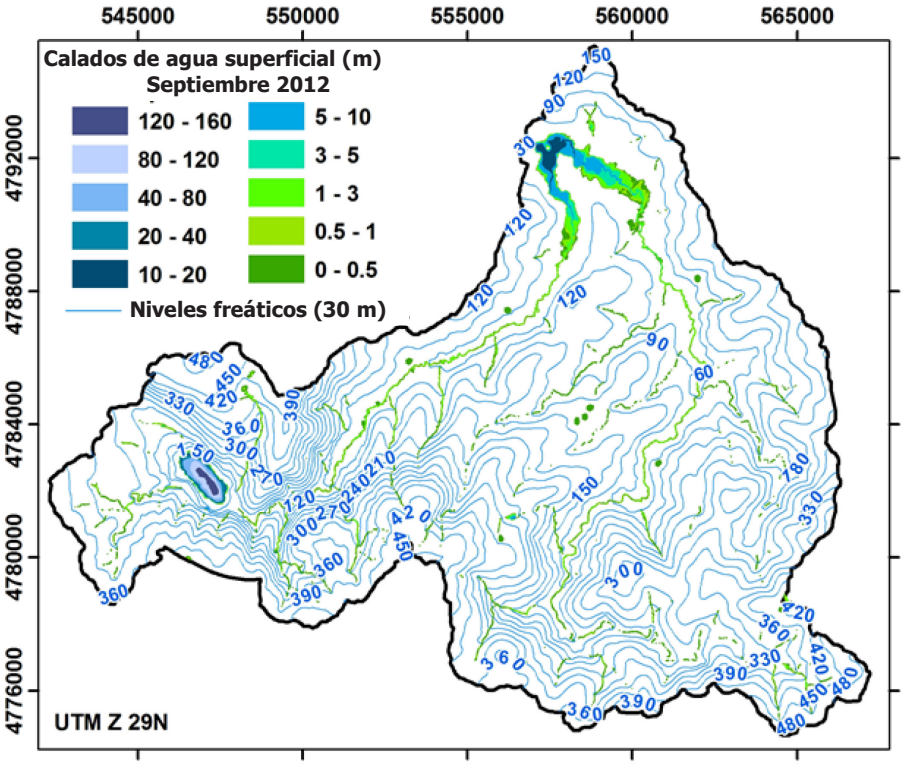

Figura 10 | Simulación de niveles de agua superficial y subterránea en Septiembre de 2012 en la Cuenca del Río Mero.

CONCLUSIONES

Uno de los principales objetivos de la aplicación del código *FreshWaterSheds* es determinar la evolución futura de los niveles freáticos y de los calados de agua superficial en la cuenca del río Mero, con especial énfasis en la mina de Meirama y el embalse de Cecebre.

En este sentido, se recopiló información hidrológica sobre los usos del agua en la cuenca del río Mero, y se realizaron aforos puntuales en los principales cauces de los ríos Barcés y Mero durante parte del periodo de simulación, 2008-2012, y ello con el propósito de calibrar las condiciones de simulación del código conjunto de las aguas subterráneas y superficiales en toda la cuenca del río Mero. Por otra parte, se diseñó el modelo discreto de la cuenca del río Mero y se determinaron los parámetros geológicos e hidrogeológicos. También se aplicaron las correspondientes condiciones de simulación en la calibración, durante un periodo de 4 años y 9 meses, durante el que se tuvieron en cuenta los niveles freáticos en pozos y piezómetros, las mediciones de caudal superficial en los cauces de mayor relevancia, la evolución de la superficie libre registrada en el lago de Meirama, la evolución de la superficie libre del embalse de Cecebre, y balances hidrológicos específicos en la zona de la mina delimitada específicamente mediante secciones. Se procedió a la calibración del modelo de la cuenca del Mero al caso de inundación de un hueco de gran calado, como la mina de Meirama, que responde al comportamiento hidrológico de un medio fracturado en el que existen bombeos, derivaciones, canales perimetrales y galerías filtrantes. Se obtuvieron resultados aceptablemente válidos que predicen el futuro reciente del llenado de la mina de Meirama. Igualmente, se modelizaron todos los usos importantes del agua en la cuenca del río Mero, en especial, los relativos a las operaciones de regulación de la presa del embalse de Cecebre, a través de las aberturas de sus elementos principales de desembalse, como es el caso, por ejemplo, de las 5 compuertas y los 3 aliviaderos (1 intermedio y 2 de fondo) existentes.

Se espera pues que los elementos de regulación actualmente implementados en el modelo de simulación *FreshWaterSheds*, permitan aportar soluciones numéricas más precisas y adecuadas al flujo integral de todos los recursos hídricos subterráneos y superficiales en cuencas reguladas de moderadas y elevadas pendientes, y pueda constituirse en definitiva también como un sistema de ayuda a la toma de decisiones en la planificación y gestión de los recursos hídricos de otras cuencas hidrográficas de características similares.

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo y aplicación práctica del código numérico MELEF a la cuenca del río Mero, ha sido posible gracias al Grupo de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (GEAMA), al Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil (CITEEC), a la empresa Lignitos de Meirama S.A. (LIMEISA), a la empresa EMALCSA, al programa María Barbeito (IN840C 2007/244-0) y al proyecto CICYT (CGL2009-11258).

REFERENCIAS

de By, R.A. et al., 2001. *Principles of Geographic Information Systems*. By Rolf A. de By. Educational Textbook Series. ITC, Enschede, The Netherlands.

de Vries, J., Simmers, I., 2002. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*, 10(1): 5-17.

Delgado, J. et al., 2008a. Water quality assessment in the restoration of the Meirama open pit mine, NW Spain. Part I. In: De Santis, A. et al. (Eds.), *Environment and Geoscience. Energy and Environmental Engineering Series*. WSEAS Press, Malta, pp. 6.

Delgado, J. et al., 2008b. *Hydrochemical characteristics of the natural waters associated with the flooding of the Meirama open pit (A Coruna, NW Spain)*. Mineral Mag, 72(1): 399-403.

Hernández, J.H., 2011. *Análisis de lo Procesos de Flujo Subterráneo y Superficial en Problemas Medioambientales: Adaptación de un Código Numérico Gestionado con SIG a la Cuenca del Río Barcés, A Coruña*. Tesis Doctoral, Universidade da Coruña: 233 pp.

Hernández, J.H., Padilla, F., Juncosa, R., Vellando, P.R. and A. Fernández 2012. A numerical solution to integrated water flows: Application to the flooding of an open pit mine at the Barcés river Catchment - A Coruña, Spain. *Journal of Hydrology*, 472-473: 328-339.

Juncosa, R. et al., 2008. Water Quality Assessment in the Reclamation of the Meirama Open Pit Mine, NW Spain. Part II. After-Flooding Assessment. In: De Santis, A. et al. (Eds.), *Environment and Geoscience. Energy and Environmental Engineering Series*. WSEAS Press, Malta, pp. 6.

Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J., Rhind, D.W., 2005. *Geographical Information Systems and Science, 2*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, 517 pp.

Moreno, J.A. et al., 2007. *Sistemas y análisis de la Información Geográfica. Manual de autoaprendizaje con ArcGIS*. Ra-Ma, Madrid, 911 pp.

Padilla, F., Cruz-Sanjulián, J., 1997. Modeling seawater intrusion with open boundary conditions. *Ground Water*, 35(4): 702-712.

Padilla, F., Méndez, A., Fernández, R., Vellando, P., 2008. Numerical modelling of surfacewater/groundwater flows for freshwater/saltwater hydrology: the case of the alluvial coastal aquifer of the Low Guadalhorce River, Malaga, Spain. *Environmental Geology*, 55(1): 215-226.

Padilla, F., Hernández, H., Juncosa, R. and Vellando, P., 2015. A Numerical Solution for the Integrated Analysis of Water Resources Management: Application to the Mero River Watershed, La Coruña, Spain. *Journal of Water Resource and Protection*, 7, 815-829.

Padilla, F., Hernández, H., Juncosa, R. and Vellando, P., 2016. Modelling integrated extreme hydrology. *International Journal of Safety and Security Engineering.* Wessex Institute. doi: 10.2495/SAFE-V0-N0-1-12.

Saad, Y., Schultz, M.H., 1986. GMRES: A Generalized Minimal Residual Algorithm for Solving Nonsymmetric Linear Systems. *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, 7(3): 856-869.

Scanlon, B., Healy, R., Cook, P., 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1): 18-39.

Sophocleous, M., 2002. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal*, 10(1): 52-67.

Winter, T.c., Harvey, J.W., Franke, O.L., Alley, W.M., 1998. *Ground water and surface water – a single resource*. In: Government, U.S. (Ed.). U.S. Geological Survey Denver, CO.