

EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN CUENCAS PIRENAICAS EN UN CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO MEDIANTE MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA DEL BALANCE DE AGUA CON LOS CÓDIGOS VISUAL-BALAN Y GIS-BALAN

L. Javier Lambán¹, Bruno Pisani², Javier Samper², y Jorge Jódar¹

¹Instituto Geológico y Minero de España (Unidad de Zaragoza). C/Manuel Lasala, 44. 9ºB, 50.006, Zaragoza, correo electrónico: javier.lamban@igme.es; dr.zruspa@gmail.com; web: <http://www.igme.es>

²Centro de Investigaciones Científicas Avanzadas (CICA), ETS de Ingenieros de Caminos, Universidade da Coruña, España, correo electrónico: j.samper@udc.es; bruno.pisani@udc.es; web: <https://cica.udc.es/es/grupo/gestion-sostenible-de-los-recursos-hidricos-y-del-suelo>

RESUMEN. El proyecto europeo EFA 210/16 (PIRAGUA) aborda la caracterización del ciclo hidrológico en los Pirineos para mejorar la capacidad de adaptación de los territorios frente a los retos impuestos por el cambio climático y apoyar la inversión destinada a la adaptación al cambio climático de la gestión de los recursos hídricos (<https://www.opcc-ctp.org/es/piragua>). Con la finalidad de ayudar a cumplir con el objetivo específico de caracterizar los recursos hídricos superficiales y subterráneos de los Pirineos y su evolución reciente, se ha realizado un estudio específico mediante la aplicación de los códigos VISUAL-BALAN y GIS-BALAN en varias cuencas pirenaicas. Se han seleccionado cuencas de ambas vertientes pirenaicas que incluyen: Alcanadre, Ara, Cinca, Ega, Alto Cardener, Alto Llobregat, Lez y Hers. Se han evaluado los recursos hídricos superficiales y subterráneos en el periodo 1981-2015. El modelo hidrológico realizado con VISUAL-BALAN y GIS-BALAN se ha calibrado con los datos de la red de aforos de la Confederación Hidrográfica del Ebro del periodo 1980-2000. La validación del modelo se ha realizado con los datos del periodo 2000-2015. El modelo calibrado se utilizará para evaluar los previsibles efectos del cambio climático en el periodo 2010-2100. Para ello se utilizarán los datos hidrometeorológicos de precipitación y temperatura de los modelos climáticos del Proyecto CLIMPY.

ABSTRACT. The European project EFA 210/16 PIRAGUA deals with the characterization of the hydrological cycle in the Pyrenees to improve the adaptability of the territories to the challenges imposed by climate change and to support the investment aimed at this adaptation (<https://www.opcc-ctp.org/es/piragua>). PIRAGUA is aligned with the strategy of cross-border cooperation of the Pyrenean Climate Change Observatory (OPCC). A specific hydrological study was performed to characterize surface water and groundwater resources of the Pyrenees and its recent evolution. Water resources have been evaluated with VISUAL-BALAN and GIS-BALAN in the following watersheds: Alcanadre, Ara, Cinca, Ega, Alto Cardener, Alto Llobregat, Lez and Hers. The hydrological model has been calibrated with streamflow data from the period 1980-2000. The model has been validated with streamflow data from the period

2000-2015. The calibrated models will be used to assess the expected impacts of the climate change in the period 2010-2100 by using climate simulations from the CLIMPY project.

1.- Introducción

Los Pirineos constituyen una cordillera montañosa que se extiende desde el Atlántico al Mediterráneo y su territorio es particularmente vulnerable a los efectos del cambio climático. Este territorio transfronterizo es la fuente de alimentación de la escorrentía y la recarga de las principales cuencas vertientes y acuíferos de la región.

El proyecto europeo PIRAGUA tiene como objetivo la evaluación y prospectiva de los recursos hídricos de los Pirineos en un contexto de cambio climático y el estudio y propuesta de medidas de adaptación con impacto en el territorio (<https://www.opcc-ctp.org/es/piragua>).

PIRAGUA se enmarca dentro del Programa Interreg V-A España-Francia-Andorra. Es un programa europeo de cooperación territorial creado para fomentar el desarrollo sostenible del territorio andorrano y de la frontera franco-española, que tiene una superficie de 115583 km² y una población de 15 millones de habitantes.

El IGME, uno de los socios de PIRAGUA, participa en el objetivo específico de caracterizar los recursos hídricos superficiales y subterráneos de los Pirineos y su evolución reciente, así como evaluar los recursos hídricos futuros a partir de los escenarios de cambio climático y las proyecciones de los usos futuros del agua.

Para alcanzar los objetivos planteados se ha propuesto utilizar en varias cuencas/masas de agua subterránea del Pirineo los códigos VISUAL-BALAN y GIS-BALAN, que permiten calcular el balance hídrico diario en el suelo, en la zona no saturada y en el acuífero. Dichos códigos han sido desarrollados por la UDC en los últimos 30 años (Samper et al., 1999, 2015, Pisani, 2008). Estos programas son muy utilizados en la Península Ibérica y en Latinoamérica para la evaluación de los recursos hídricos, la estimación de la recarga y la evaluación del impacto hidrológico del cambio climático (Alvares y Samper 2009, Espinha et al. 2009, 2010; Pisani et al. 2011, 2013, 2017; Samper et al. 1999, 2011a,b).

Este trabajo presenta un avance de los resultados

disponibles que incluyen los modelos hidrológicos de las cuencas de los ríos Alcanadre (Prepirineo central), Ara (Pirineo central) y Ega (Prepirineo occidental).

2.- Metodología adoptada en el proyecto PIRAGUA

2.1.- Selección de las cuencas de estudio

Se han seleccionado las cuencas de los siguientes ríos: 1) Alcanadre, 2) Ara, 3) Ega, 4) Cinca, 5) Alto Cardener-Alto Llobregat, 6) Lez (Pirineo francés), y 7) Hers (Pirineo francés).

Los criterios tenidos en cuenta para la selección de estas cuencas son: a) El predominio de acuíferos carbonatados y/o kársticos, dada la mayor influencia de las aguas subterráneas en el balance y su mayor vulnerabilidad inicial frente al cambio climático, b) La situación geográfica, teniendo en cuenta diferentes vertientes y sectores del Pirineo y Prepirineo, c) Los límites hidrogeológicos bien definidos, c) La disponibilidad de datos de aforo y/o niveles piezométricos en régimen no influenciado y d) La proximidad a zonas de especial interés como el Parque Nacional de Ordesa en España y el Parc National des Pyrénées en Francia.

En una primera fase se ha abordado el modelo hidrológico de balance de las cuencas de los ríos Alcanadre, Ara y Ega. Se trata de cuencas situadas en la vertiente española del Pirineo y Prepirineo sobre materiales calcáreos que presentan importantes grados de karstificación en algunas zonas (Fig. 1).

2.2.- Modelos climáticos y escenarios de cambio climático

Se han utilizado las series diarias de P y T generadas por los modelos climáticos del proyecto CLIMPY, tanto para el periodo histórico (1981-2015) como para el periodo de predicción (2010-2100).

El objetivo básico del proyecto CLIMPY es conocer la evolución y las tendencias del clima de los Pirineos en el contexto del cambio global, mediante la unificación y homogeneización de la información existente, el desarrollo de indicadores climáticos y la realización de proyecciones futuras, con objeto de reducir la vulnerabilidad de los impactos del cambio del clima y adaptarse a sus efectos mediante la transferencia de conocimiento.

Para realizar las predicciones climáticas hasta el año 2100, en el proyecto CLIMPY se están considerando 3 escenarios de emisión (RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5) y 19 modelos numéricos. En la fecha en que se ha terminado de escribir este artículo no se ha decidido aún qué modelos y escenarios se utilizarán finalmente.

2.3.- Metodología para el modelo de balance

La elaboración del modelo de balance hidrológico ha requerido realizar las siguientes tareas: 1) La recopilación de los datos e información geográfica, los usos y tipos de suelos, el mapa geológico y los datos de aforo y piezométricos; 2) La delimitación de las zonas homogéneas del modelo de balance

a partir de la información geológica, geográfica, y de tipos y usos del suelo. Una zona homogénea es una parte de la zona de estudio en la que los parámetros y propiedades hidrológicas del medio son homogéneas; y 3) La selección de los datos de aforos y/o niveles así como la asignación de la fiabilidad de los datos seleccionados para la calibración del modelo.

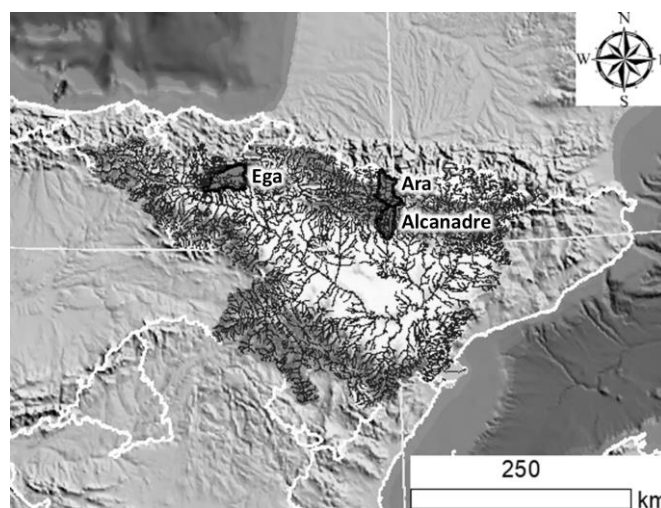


Fig. 1. Mapa de situación de las cuencas estudiadas en la cuenca del Ebro.

Los modelos hidrológicos se han calibrado en el periodo comprendido entre octubre de 1980 y septiembre de 2000. La validación se ha realizado entre octubre de 2000 y septiembre de 2015. La duración de los periodos de calibración y validación fue acordada para todos los modelos realizados en el proyecto PIRAGUA y suponen el 60% y el 40% (aproximadamente) de la duración total del periodo histórico, respectivamente.

La calibración de los modelos hidrológicos de balance de agua se ha realizado utilizando los datos diarios de aforos disponibles en el proyecto PIRAGUA. Adicionalmente, en la cuenca del río Ega se han utilizado los datos de niveles de 4 piezómetros para calibrar los parámetros del modelo hidrológico de manera más detallada.

Los modelos hidrológicos se han calibrado utilizando datos de los caudales calculados diarios, mensuales y anuales disponibles en las estaciones de aforos situadas en los puntos de cierre de cada cuenca. En la cuenca del río Ara, también se han utilizado los datos de una estación de aforos situada en la cabecera de la cuenca (Torla).

La calibración de los parámetros del modelo hidrológico se ha realizado mediante por tanteos sucesivos de acuerdo con las siguientes fases:

1) 1ª fase: ajuste de las aportaciones anuales. En primer lugar, se han calibrado los coeficientes de la interceptación, la reserva útil del suelo y los parámetros de la escorrentía superficial, de la recarga en tránsito directa y del cálculo de la ETR para ajustar la aportación media anual calculada a la medida en la estación de aforos a la salida de la cuenca en el periodo comprendido entre octubre de 1980 y septiembre de 2000. El ajuste de las aportaciones anuales se ha

evaluado tanto de forma visual como de forma cuantitativa utilizando el coeficiente de Nash-Sutcliffe con valores logarítmicos (Saleh et al., 2000; Krause et al., 2005; Ritter et al., 2011; Ritter y Muñoz-Carpena, 2013).

2) 2ª fase: Ajuste de las aportaciones mensuales. La segunda fase se ha basado en reproducir las aportaciones mensuales medidas en la estación de aforos situada a la salida de la cuenca. Para ello, se han variado los parámetros que controlan los procesos nivales y que tienen gran influencia en la distribución mensual de las aportaciones durante el transcurso del año. La calidad del ajuste mensual se ha evaluado tanto de forma visual como de manera cuantitativa utilizando el coeficiente de Nash-Sutcliffe con valores logarítmicos.

3) 3ª fase: Ajuste de los caudales diarios. En la tercera fase se han ajustado los caudales diarios calculados a los datos de aforos en la estación situada a la salida de la cuenca. Para ello, se han calibrado los parámetros de la escorrentía superficial, el coeficiente de agotamiento del flujo hipodérmico, el coeficiente de agotamiento del flujo subterráneo y la transmisividad del acuífero. En esta fase se ha procurado reproducir con el modelo los siguientes elementos del hidrograma del caudal: a) los picos del hidrograma debidos a la escorrentía superficial, b) los picos intermedios debidos fundamentalmente al flujo hipodérmico, c) la parte inicial de las curvas de agotamiento que en general suelen estar asociadas al flujo hipodérmico, y d) la parte final de las curvas de agotamiento que en general suelen estar asociadas al flujo subterráneo. El ajuste de los caudales diarios se ha evaluado de forma visual.

Para calibrar los parámetros del suelo y de la zona no saturada, se han tenido en cuenta los datos disponibles de la vegetación, la pendiente media del terreno, hidrológicos, geológicos e hidrogeológicos (Samper et al., 1999; Pisani, 2008, Espinha Marques et al., 2010). La vegetación se ha identificado a partir del mapa de usos del suelo del Corine Land Cover. La información hidrogeológica se ha deducido a partir del mapa de masas de agua subterránea de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE).

Se ha considerado de forma general que las zonas con mayor pendiente del terreno tienen menor espesor del suelo, más escorrentía superficial y más flujo hipodérmico.

Las zonas boscosas (coníferas, bosque mediterráneo y bosque mixto) tienen más interceptación y evapotranspiración que las zonas de cultivo de secano o de escasa vegetación.

Para calibrar los parámetros del acuífero se han tenido en cuenta los mapas de masas de agua subterránea de la CHE.

En la Tabla 1 se indica la relación entre las características físicas de las zonas homogéneas y los parámetros del código BALAN. Esta correspondencia se ha tenido en cuenta para agrupar las zonas homogéneas con características físicas e hidrológicas similares y calibrar los parámetros de cada una de ellas.

En nuestra amplia experiencia de modelización hidrológica con los modelos distribuidos y semidistribuidos realizados con los códigos de la serie BALAN se ha constatado que los caudales diarios calculados con el código BALAN suelen

contener mayores incertidumbres que las aportaciones mensuales o anuales. Estas mayores incertidumbres se deben a: 1) las hipótesis del modelo conceptual adoptado; 2) las ecuaciones empíricas y semiempíricas utilizadas en los códigos de la serie BALAN y 3) Al uso de intervalos diarios para resolver las ecuaciones del balance de agua (Samper et al., 1999). Dichas incertidumbres son menos relevantes a escala mensual y anual.

Dado que el objetivo de este estudio es evaluar los recursos hídricos superficiales, y especialmente los recursos subterráneos, se ha puesto más énfasis en la calibración de los modelos con las aportaciones mensuales y anuales. El análisis del ajuste de los caudales diarios calculados a los medidos se ha utilizado como apoyo al proceso general de calibración.

Tabla 1. Relación entre las características físicas e hidrológicas de las zonas homogéneas y los parámetros de los códigos VISUAL-BALAN y GIS-BALAN.

Característica física/hidrológica	Parámetros de VISUAL-BALAN y GIS-BALAN
Pendiente del terreno	• Espesor del suelo y reserva útil • Parámetros CIM0 y CIM1 de la escorrentía superficial • Coeficiente de agotamiento del flujo hipodérmico
Vegetación (usos del suelo)	• Coeficientes de cálculo de la interceptación • Coeficientes de cálculo de la ETR
Hidrogeología / masas de agua subterránea	• Reserva útil y permeabilidad vertical del suelo • Parámetros de la recarga en tránsito directa • Parámetros CIM0 y CIM1 de la escorrentía superficial • Coeficiente de agotamiento de la percolación • Coeficiente de agotamiento del flujo subterráneo • Coeficiente de almacenamiento

2.4.- Datos disponibles

Se ha dispuesto de las series diarias de P y T que se han generado con los modelos climáticos del proyecto CLIMPY. Estas series cubren el periodo 1980-2015 (calibración y validación) y 2010-2100 (predicción). Para la calibración de los modelos se ha tenido en cuenta el promedio de los datos de P y T obtenidos por CLIMPY para cada una de las zonas homogéneas.

Para la calibración del modelo hidrológico se ha contado con los datos diarios de aforo en las estaciones situadas en la salida de cada cuenca. Se ha dispuesto además de los datos de otras estaciones de aforo intermedias y de niveles piezométricos. Los datos de aforo disponibles corresponden a estaciones de la red de la CHE que están operativas desde la década de 1940.

3.- Modelo hidrológico de la cuenca del río Alcanadre

La cuenca del río Alcanadre aguas arriba de Lascellas está situada en la zona norte de la cuenca del río Ebro. Se trata de una cuenca prepirenaica de 503 km² de superficie

ocupada principalmente por montes de árboles mediterráneos de hojas duras (vegetación esclerófila), cultivos de secano en las zonas más bajas y algunos cultivos en regadío en las riberas del río Alcanadre.

La altitud de la cuenca varía entre 366 y 1980 msnm y tiene un valor medio de 921 msnm.

La pendiente del terreno en la cuenca tiene un valor medio del 23%.

Las zonas homogéneas del modelo hidrológico de la cuenca del río Alcanadre se han delimitado en dos etapas. Primeramente, se ha dividido la cuenca considerando las isoyetas medias anuales calculadas a partir de las series históricas de precipitación en las estaciones de la red de la AEMET (Samper y Álvarez, 2008). A continuación, se han tenido en cuenta los límites de las masas de agua subterránea de la CHE. De esta forma, la cuenca del río Alcanadre se ha dividido en 7 zonas homogéneas (Fig. 2).

Las Figuras 3 y 4 muestran los ajustes de las aportaciones mensuales calculadas con el modelo hidrológico de balance a las aportaciones medidas en la estación de Lascellas en el río Alcanadre entre octubre de 1980 y septiembre de 2000 (periodo de calibración) y entre octubre de 2000 y septiembre de 2015 (periodo de validación), respectivamente.

La Tabla 2 presenta los valores del coeficiente de Nash-Sutcliffe del ajuste de los logaritmos de las aportaciones mensuales y anuales en las cuencas seleccionadas. En la cuenca del río Alcanadre el índice de Nash es igual a 0.51 para las aportaciones mensuales y 0.83 para las aportaciones anuales. El ajuste es similar en los periodos de calibración y validación.

En la Tabla 2 se presenta además la valoración de la calidad del ajuste del modelo hidrológico según las clasificaciones adoptadas por Ritter y Muñoz-Carpena (2013) (más restrictiva) y Saleh et al. (2000) (menos restrictiva). Estos últimos utilizaron su clasificación para evaluar el ajuste de modelos hidrológicos realizados con el código SWAT.

Tabla 2. Coeficientes de Nash-Sutcliffe (NSE) de los ajustes de los logaritmos de las aportaciones mensuales y anuales calculadas a las medidas en las cuencas de los ríos Alcanadre, Ara y Ega. La valoración de la calidad del ajuste según Ritter y Muñoz-Carpena (2013) se indica con un * y la valoración con el método de Saleh et al. (2000) con **.

Cuenca	Ajuste	1980/81 - 1999/00 Calibración		2000/01 - 2014/15 Validación	
		NSE	Calidad del ajuste	NSE	Calidad del ajuste
Alcanadre	Mensual	0.51	*insatisfactorio **satisfactorio	0.52	*insatisfactorio **satisfactorio
	Anual	0.83	*bueno **muy bueno	0.84	*bueno **muy bueno
Ara	Mensual	0.40	*insatisfactorio **insatisfactorio	0.73	*aceptable **muy bueno
	Anual	0.64	*insatisfactorio **adecuado	0.94	*muy bueno **muy bueno
Ega	Mensual	0.54	*insatisfactorio **adecuado	0.63	*insatisfactorio **adecuado
	Anual	0.71	*aceptable **muy bueno	0.71	*aceptable **muy bueno

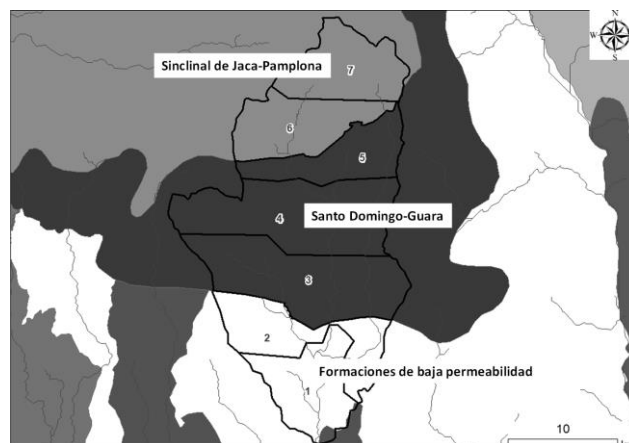


Fig. 2. Mapa de zonas homogéneas del modelo hidrológico de la cuenca del río Alcanadre y límites de las masas de agua subterránea de la CHE (<http://iber.chebro.es/geoportal/>).

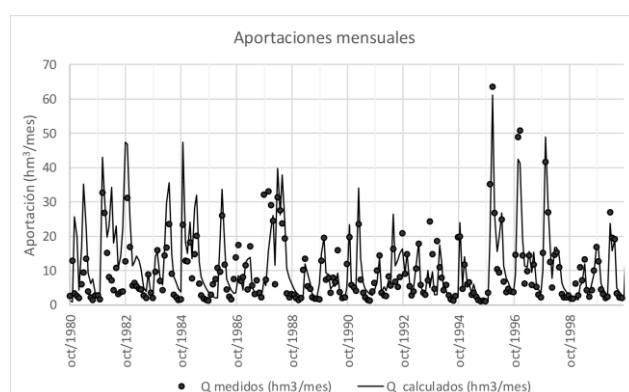


Fig. 3. Aportaciones mensuales medidas en la estación de Lascellas en el río Alcanadre entre octubre de 1980 y septiembre de 2000 (periodo de calibración) y aportaciones calculadas con el modelo hidrológico de balance.

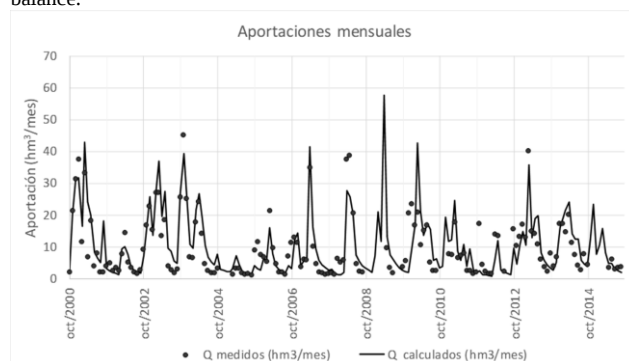


Fig. 4. Aportaciones mensuales medidas en la estación de Lascellas en el río Alcanadre entre octubre de 2000 y septiembre de 2015 (periodo de validación) y aportaciones calculadas con el modelo hidrológico de balance.

4.- Cuenca del río Ara

La cuenca del río Ara aguas arriba de Boltaña está situada en la zona norte de la cuenca del río Ebro (Fig.1). Se trata de una cuenca pirenaica de 634 km² de superficie ocupada principalmente por montes de árboles mediterráneos de hojas duras, pinares, bosque mixto y algunas pasturas y roquedos. El sector NE de la cuenca forma parte del Parque Nacional de Ordesa (Jódar et al., 2016).

La altitud en la cuenca varía entre 544 y 3350 msnm y tiene un valor medio de 1504 msnm. La pendiente del terreno tiene un valor medio del 43.5%.

Las seis zonas homogéneas del modelo hidrológico de la cuenca del río Ara se han delimitado considerando los límites de las masas de agua subterránea de la CHE y los mapas de altitud y de pendiente del terreno (Fig. 5).

Las Figuras 6 y 7 muestran los ajustes de las aportaciones mensuales calculadas con el modelo hidrológico de balance a las aportaciones medidas en la estación de Boltaña en el río Ara en los periodos de calibración y validación, respectivamente.

Hay discrepancias entre las aportaciones calculadas y las medidas en los años 1987, 1988 y 1992, especialmente en los meses de abril, mayo y junio. Hay que tener en cuenta que en las cuencas de montaña los picos de escorrentía más importantes del año se suelen producir en esos meses generalmente asociados con la fusión rápida de la capa de nieve. Estas las discrepancias entre los valores calculados por el modelo y los podrían ser debidas a los errores en los datos de aforo. Se ha constatado que los caudales medios mensuales proporcionados por el proyecto PIRAGUA en los meses de abril, mayo y junio de 1992 en la estación de aforos de Boltaña en el río Ara son mucho mayores que los caudales proporcionados por la CHE a la UDC para un estudio realizado en el año 2007 (Samper et al., 2007; Samper y Álvarez, 2008).

Para el cálculo del índice de Nash-Sutcliffe se han excluido las aportaciones mensuales de abril, mayo y junio de 1992. El índice de Nash-Sutcliffe resultante en el periodo de calibración es igual a 0.40 para las aportaciones mensuales y 0.64 para las aportaciones anuales (Tabla 2). El ajuste en el periodo de validación es mejor que el ajuste en el periodo de calibración. Este resultado, aparentemente paradójico, podría ser debido a que los datos de aforos más recientes son más fiables.

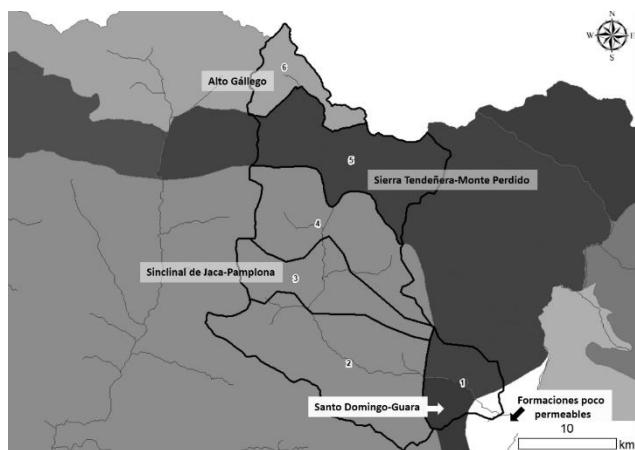


Fig. 5. Mapa de zonas homogéneas del modelo hidrológico de la cuenca del río Ara y de límites de las masas de agua subterránea de la CHE (<http://iber.chebro.es/geoportail/>).

Hay que tener en cuenta también que el índice de Nash-Sutcliffe es sensible a la presencia de valores anómalos extremos. Los índices de Nash-Sutcliffe de las aportaciones mensuales y anuales disminuyen desde 0.4 y 0.64 hasta 0.39 y 0.22, respectivamente cuando se consideran las aportaciones de abril, mayo y junio de 1992. Se están analizando las posibles causas de estas discrepancias.

5.- Cuenca del río Ega

La cuenca del río Ega aguas arriba de Estella está situada en la zona oeste de la cuenca del río Ebro. Se trata de una cuenca prepirenaica de 876 km² de superficie ocupada principalmente por montes de árboles mediterráneos, pasturas y algunos cultivos, tanto en secano como en regadío (EPTISA, 2017).

La altitud en la cuenca Ega varía entre 406 y 1385 msnm y tiene un valor medio de 789 msnm. La pendiente del terreno en la cuenca tiene un valor medio del 13.9 %.

Las zonas homogéneas del modelo hidrológico de la cuenca del río Ega se han delimitado teniendo en cuenta los límites de las masas de agua subterránea de la CHE y la situación de las estaciones de aforo en la red hidrográfica de la cuenca. La cuenca del río Ega se ha dividido en 9 zonas homogéneas (véase la Fig. 8).

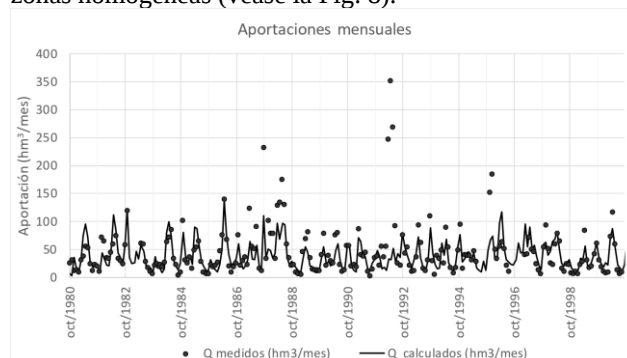


Fig. 6. Aportaciones mensuales medidas en la estación de Boltaña en el río Ara entre octubre de 1980 y septiembre de 2000 (periodo de calibración) y aportaciones calculadas con el modelo hidrológico de balance.

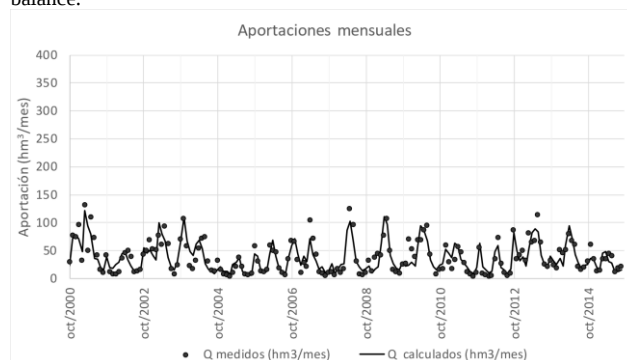


Fig. 7. Aportaciones mensuales medidas en la estación de Boltaña en el río Ara entre octubre de 2000 y septiembre de 2015 (periodo de validación) y aportaciones calculadas con el modelo hidrológico de balance.

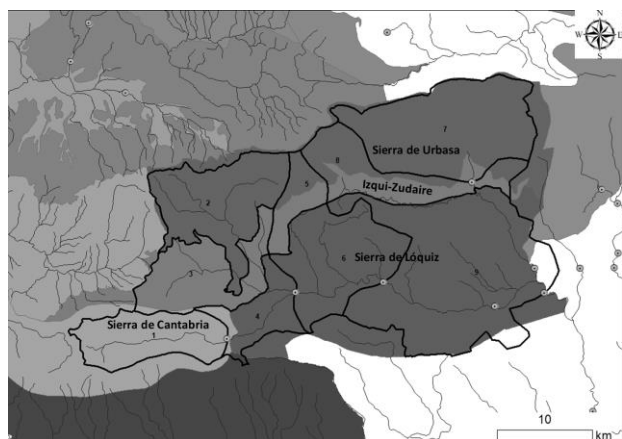


Fig. 8. Mapa de zonas homogéneas del modelo hidrológico de la cuenca del río Ega y de límites de las masas de agua subterránea de la CHE (<http://iber.chebro.es/geoportail/>).

Las Figuras 9 y 10 muestran los ajustes de las aportaciones mensuales calculadas con el modelo hidrológico de balance a las aportaciones medidas en la estación de Estella en el río Ega en los periodos de calibración y validación, respectivamente.

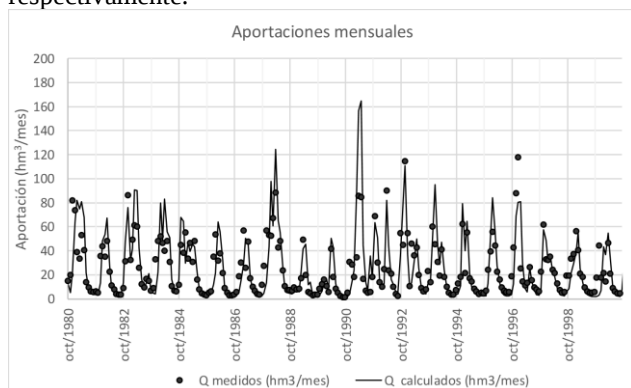


Fig. 9. Aportaciones mensuales medidas en la estación de Estella en el río Ega entre octubre de 1980 y septiembre de 2000 (periodo de calibración) y aportaciones calculadas con el modelo hidrológico de balance.

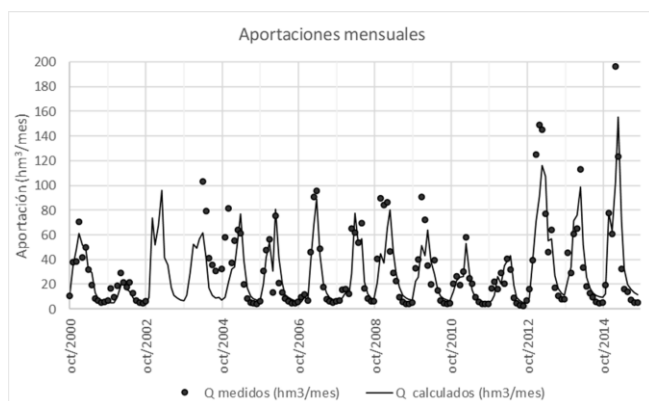


Fig. 10. Aportaciones mensuales medidas en la estación de Estella en el río Ega entre octubre de 2000 y septiembre de 2015 (periodo de validación) y aportaciones calculadas con el modelo hidrológico de balance.

En la cuenca del río Ega el índice de Nash en el periodo de calibración es igual a 0.54 para las aportaciones mensuales y 0.71 para las aportaciones anuales (Tabla 2). El ajuste en el periodo de validación es similar al ajuste en el periodo de calibración.

6.- Resultados y trabajos futuros

El ajuste de las aportaciones calculadas con los modelos hidrológicos realizados a las aportaciones medidas es en general bueno. Las discrepancias entre los valores calculados por el modelo y los valores medidos pueden ser debidas a una o varias de las siguientes causas:

1. Las incertidumbres del modelo hidrológico, especialmente en la representación de los procesos nivales, de los que no se dispone de información suficiente para calibrar los parámetros que determinan los procesos nivales.
2. Las incertidumbres del modelo climático que se ha utilizado para generar la serie de precipitaciones. Los modelos climáticos no siempre suelen reproducir correctamente las precipitaciones históricas, sobre todo en los periodos con precipitaciones excepcionales y en zonas en las que no se dispone de suficientes datos en estaciones meteorológicas.
3. Los errores en los datos de aforo.

La Tabla 3 presenta los resultados medios anuales del balance hídrico en las cuencas de los ríos Alcanadre, Ara y Ega para el periodo 1980/81 - 2014/15.

Las aportaciones (Q) constituyen entre el 31% y el 53% de la precipitación media anual (P). Las cuencas de los ríos Alcanadre y Ega, situadas en el prepirineo, tienen una relación Q/P similar, igual a 31% y 33%, respectivamente.

La relación entre la recarga, R, y P, es igual a 16% en la cuenca del Alcanadre, 28% en la cuenca del Ara y 26% en la cuenca del Ega.

Está prevista la realización de modelos hidrológicos de balance en las cuencas de los ríos Cinca, Alto Cardener-Alto Llobregat, Lez y Hers. Los modelos hidrológicos se utilizarán también para evaluar los recursos hídricos en los distintos escenarios de cambio climático previstos en el proyecto CLIMPY.

También está previsto analizar la evolución temporal a largo plazo de la humedad del suelo y de la zona no saturada para distintos escenarios de cambio climático en zonas con diferentes características hidrológicas, geológicas, hidrogeológicas y cobertura vegetal y usos del suelo para evaluar cómo podría cambiar la frecuencia y la duración de los periodos secos y sus posibles impactos.

7.- Conclusiones

Se han presentado los trabajos realizados en el estudio titulado "Modelización numérica del balance de agua en el suelo mediante la aplicación del código GIS-BALAN en diversas cuencas/masas de agua subterránea del Pirineo (1ª fase)".

La calibración del modelo hidrológico de balance de las cuencas de los ríos Alcanadre, Ara y Ega se ha realizado utilizando las series diarias de P y T de los modelos climáticos del proyecto CLIMPY como datos de entrada. El modelo hidrológico se ha calibrado para optimizar el ajuste de los caudales anuales, mensuales y

diarios calculados a los datos de aforo en las estaciones situadas en los puntos de cierre de las cuencas. El ajuste del modelo a los datos de aforo mensuales en las cuencas de los ríos Alcanadre, Ara y Ega varía entre adecuado e insatisfactorio según la clasificación de Saleh et al. (2000), pero es insatisfactorio según los criterios de Ritter y Muñoz-Carpena (2013). Hay que tener en cuenta, no obstante, que los anteriores criterios se establecieron para medir la calidad del ajuste de los resultados de un modelo en términos de valores naturales. Se carece de información sobre la interpretación de los resultados de la calibración de un modelo cuando el índice de Nash-Sutcliffe se calcula con los logaritmos de los caudales (como se ha hecho en el presente trabajo).

El modelo hidrológico se podría mejorar mediante la utilización de datos piezométricos adicionales y de datos de aforo en estaciones no utilizadas en esta primera versión. El modelo hidrológico proporcionará una herramienta muy útil para la evaluación de los recursos hídricos en las cuencas del Pirineo, en la actualidad y en futuros escenarios de cambio climático y de usos del suelo.

En las siguientes fases del estudio se presentarán los resultados de los modelos de las restantes cuencas, así como las predicciones de los cambios previstos en los recursos hídricos debido a los efectos del cambio climático.

Tabla 3. Resultados medios anuales de los modelos hidrológicos de balance de las cuencas de los ríos Alcanadre, Ara y Ega en el periodo 1980/81 - 2014/15 (expresados en mm).

	Alcanadre	Ara	Ega
Precipitación total	885	1365	1068
Precipitación nival	62	392	154
Interceptación	113	160	245
ETR	499	482	471
Recarga en tránsito	262	702	352
Escurrimiento superficial	12	20	2
Flujo hipodérmico	116	322	70
Recarga al acuífero	146	380	282
Caudal subterráneo	146	380	281
Aportación	273	721	353

Agradecimientos. El proyecto EFA210/16 PIRAGUA ha sido cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del Programa Interreg V-A España-Francia-Andorra (POCTEFA 2014-2020) creado por la Unión Europea. Los trabajos previos del equipo de la Universidad de A Coruña en la Cuenca del Ebro contaron con el apoyo y la financiación de la Confederación Hidrográfica del Ebro. Se agradecen los comentarios y sugerencias del revisor anónimo que han contribuido a mejorar significativamente la versión final de este trabajo.

8.- Bibliografía

Alvares D. y J. Samper, 2009. Evaluación de los recursos hídricos de la cuenca hidrográfica del Ebro mediante GISBALAN, En: IX Jornadas de Zona no Saturada, ZNS'09, Barcelona. Vol IX. 491-498.
EPTISA, 2017. Realización de un ensayo de bombeo de larga duración y elaboración de un modelo hidrogeológico como soporte para la explotación racional del acuífero en el sector de Ancín (Valdega). Informe

inédito realizado para el Departamento de Desarrollo Rural, Medio Ambiente y Administración Local del Gobierno de Navarra.
Espinha Marques J, J. Samper, B. Pisani, D. Alvares, J. M. Carvalho, H. I. Chaminé, J. M. Marques, F. Sodrê Borges, 2009. Assessment of water resources in a mountain environment with a semi-distributed hydrological model: Serra da Estrela case, central Portugal, En: IX Jornadas de Zona no Saturada, Barcelona Vol IX. pp 514-521.
Espinha Marques, J., J. Samper, B. Pisani, D. Alvares, J.M. Carvalho, H.I. Chaminé, J.M. Marques, G.T. Vieira, C. Mora y F. Sodrê Borges, 2010. Evaluation of water resources in a high-mountain basin in Serra da Estrela, Central Portugal, using a semi-distributed hydrological model. *Environ. Earth Sci.* 62:6, 1219-1234.
Jódar, J., L. J. Lambán y E. Custodio, 2016. Estimación de la recarga mediante la modelación numérica del balance de agua en el suelo en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido (Huesca, España). En: Las aguas subterráneas y la planificación hidrológica. Congreso hispano-luso. AIH-GE. Madrid, noviembre 2016. ISBN: 978-84-938046-5-7.
Krause, P., D. P. Boyle y D.F. Base, 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *ADGEO* (5), pp. 89-97.
Pisani, B., 2008. Acoplamiento de modelos hidrológicos semidistribuidos y sistemas de información geográfica. Tesis Doctoral. Universidade da Coruña. <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/1102> (verificado en mayo de 2019).
Pisani, B, J Samper, L Ribeiro, Y Fakir, y T Stigter, 2011, Evaluación de los impactos del cambio climático en el acuífero de la Plana de la Galera. En: Jornadas de Zona no Saturada Vol X ZNS 2011, José Martínez y Nilda Sánchez Ed, 353-358
Pisani, B, J Samper y MA García-Vera, 2013, Evaluación de los impactos del cambio climático en los recursos y en las demandas agrarias de la cuenca del río Jalón. En: XI Jornadas de La Zona no Saturada, Lugo, 6-8 Noviembre, 219-226
Pisani, B., J Samper y A Paz, 2017, Modelos hidrológicos de balance de agua y evaluación de los impactos del cambio climático en zonas rurales de Galicia con eucaliptos, En: Estudios de la Zona no Saturada Vol XIII, Zaragoza, 8-10 noviembre. 565-576.
Ritter, A. y R. Muñoz-Carpena, 2013. Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *J Hydrol* 480 (2013), pp 33-45.
Ritter, A., R. Muñoz-Carpena y C.M. Regalado, 2011. Capacidad de predicción de modelos aplicados a la ZNS: herramienta informática para la adecuada evaluación de la bondad-de-ajuste con significación estadística. pp. 259-264. En: J. Martínez Fernández y N. Sánchez Martín (eds.). Estudios de la Zona No Saturada del Suelo, Vol X. Universidad de Salamanca. ISBN: 978-84-694-6642-1
Saleh, A, J. G. Arnold, P. W. Gassman, L. M. Hauk, W. D. Rosenthal, J. R. Williams y A. M. S. MacFarland, 2000. Application of SWAT for the upper North Bosque River watershed. *Trans. ASAE* 43(5): 1077-1087.
Samper, J, y D. Álvares, 2008. Evaluación preliminar de la incidencia del cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca del Ebro, Informe Técnico inédito realizado para la Confederación Hidrográfica del Ebro, Ref. 2005-PH-22-I.
Samper, J., Ll. Huguet, J. Ares, y M.A. García Vera, 1999. Manual del usuario del programa VISUAL BALAN v1.0: código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga. ENRESA (05/99). Madrid. 134 pp.
Samper, J., B. Pisani y D. Alvares y M. A. García Vera, 2007. Evaluación del efecto del cambio climático en la cuenca hidrográfica del Ebro mediante modelos hidrológicos y Sistemas de Información Geográfica, En: VIII Jornadas de Zona no Saturada, ZNS'07, Córdoba, J.V. Giráldez y F.J. Jiménez Ed., 347-353.
Samper, J., B. Pisani y J. Espinha-Marques, 2011a. Estudio del flujo hipodérmico en zonas de montaña. Actas de las X Jornadas de Estudios en la Zona No Saturada, ZNS'11. Salamanca. Pp. 365-370.
Samper, J, Y Li, B Pisani, L Ribeiro, Y Fakir, y T Stigter 2011b, Evaluación de los impactos del cambio climático en los acuíferos de la Plana de La Galera y del aluvial de Tortosa. En: Jornadas de Zona no Saturada Vol X ZNS 2011, José Martínez y Nilda Sánchez Ed, 359-364.
Samper, J., B. Pisani, y J. Espinha Marques, 2015. Hydrological models of interflow in three Iberian mountain basins. *Environ Earth Sci*, 73(6):2645-2656. doi:10.1007/s12665-014-3676-9.