

DOI: 10.24850/j-tyca-14-04-01

Artículos

**Estimación del balance hídrico y gestión usando
modelos de simulación: caso cuenca del río Cabe**
**Estimation of water budget and management using
simulation models: Case of the Cabe river basin**

Raymundo Rangel-Parra¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8984-8494>

Xan Neira², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1141-6023>

Jorge Dafonte³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4305-1521>

¹Departamento de Ingeniería Agroforestal, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Santiago de Compostela, Lugo, España, rangel.ray@hotmail.com

²Departamento de Ingeniería Agroforestal, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Santiago de Compostela, Lugo, España, xan.neira@usc.es

³Departamento de Ingeniería Agroforestal, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Santiago de Compostela, Lugo, España, jorge.dafonte@usc.es

Autor para correspondencia: Raymundo Rangel-Parra,
rangel.ray@hotmail.com

Resumen

Actualmente se cuenta con métodos y modelos matemáticos para el cálculo y la simulación del ciclo hidrológico, que es una etapa fundamental para la correcta contabilización de los recursos hídricos en una cuenca. El objetivo de este trabajo es el de realizar un nuevo ensamble de modelos de simulación hidrológica y de gestión de recursos hídricos, así como evaluar su desempeño contrastando los resultados con los datos oficiales reportados en el actual Plan Hidrológico para la subcuenca del río Cabe, en Galicia, España. Los resultados de las simulaciones hidrológicas obtenidos se compararon con dos estudios similares en la región para verificar su validez. Finalmente, en la etapa de simulaciones de la gestión de recursos hídricos se encontró que los resultados de este estudio presentan una mayor aproximación a los datos observados en comparación con los resultados reportados en el Plan Hidrológico vigente. Por lo tanto, se considera que el ensamble de métodos y modelos propuestos en este trabajo es una contribución para obtener resultados de calidad que ayuden a mejorar las situaciones de la gestión actual de recursos en la región del río Cabe, así como para hacer frente a los impactos del cambio climático en los recursos hídricos.

Palabras clave: balance hídrico, gestión, simulación, río Cabe, Visual-Balan, AQUATOOL.

Abstract

Currently, there are mathematical methods and models for the calculation and simulation of the hydrological cycle, which is a fundamental stage for the correct accounting of water resources in a basin. The objective of this work is to carry out a new assembly of hydrological simulation and water resources management models, as well as to evaluate their performance by contrasting the results with the official data reported in the current Hydrological Plan, for the Cabe river sub-basin, in Galicia, Spain. The results of the hydrological simulations obtained were compared with two similar studies in the region to verify their validity. Finally, in the water resources management simulation stage, it was found that the results of this study present a greater approximation to the observed data compared to the results reported in the current Hydrological Plan. In this way, it is considered that the assembly of methods and models proposed in this work is a contribution to obtain quality results that help to improve the situations of the current management of resources in the Cabe river region, as well as to face the impacts of climate change on water resources.

Keywords: Water budget, management, simulation, Cabe River, Visual-Balan, AQUATOOL.

Recibido: 08/02/2021

Aceptado: 27/12/2021

Introducción

La definición de “recursos hídricos” se refiere a las cantidades de agua que son utilizadas para las actividades de las sociedades humanas. El ser humano no es el único usuario de los recursos hídricos, ya que todos los ecosistemas, junto a sus elementos bióticos-abióticos, necesitan del agua para su funcionamiento e interacciones. La Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2018) establece que: “El agua es una condición previa para la existencia humana y para la sostenibilidad del planeta”.

Para poder utilizar y gestionar los recursos hídricos sosteniblemente es necesario poder cuantificarlos de manera precisa. De acuerdo con Diamond (2005), desde que se tiene conocimiento de las civilizaciones, como los egipcios, griegos, romanos, mayas y hasta el presente, su supervivencia estuvo marcada por la manera en que gestionaron sus recursos naturales. Diamond muestra en su investigación cómo la incorrecta gestión de los recursos llevó a la extinción o desplazamiento de civilizaciones enteras. En la actualidad y con mayor intensidad desde lo establecido en el protocolo de Kioto en 1997, se ha intensificado el monitoreo y estudio de los recursos hídricos, al grado de que hoy en día se cuenta con técnicas matemáticas asistidas por programas

especializados que facilitan el análisis-investigación de los recursos hídricos desde nivel de cuenca hasta el nivel de ciudades o pueblos.

Para abordar los desafíos de gestión de recursos hídricos por lo general se necesitan respuestas en dos áreas clave: las que aborden cuestiones estructurales, incluyendo la generación y adquisición de datos e información, infraestructura y operaciones y mantenimiento; y las institucionales, que abarcan cuestiones tales como políticas y fijación de precios, o conocimiento e información (GWP & INBO, 2009). Por otra parte, un enfoque propuesto por la Organización de las Naciones Unidas de la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2019) es el denominado Water Accounting and Auditing (WA&A). Una de las perspectivas del Water Accounting está fundamentada en la hidrología. Tal perspectiva hidrológica está firmemente basada en el entendimiento del proceso físico que gobierna los volúmenes y tasas de cambio en el flujo de agua, así como de las existencias en diferentes territorios, y/o bajo diferentes condiciones climáticas o régimen de manejo. Otro aspecto crítico del Water Accounting es que se debe considerar y evaluar tanto la oferta como la demanda de los sistemas de suministro de agua. Del lado de la oferta es importante conocer lo más preciso posible la disponibilidad en espacio y tiempo de lluvia, agua superficial, agua subterránea y fuentes de agua poco convencional. Del lado de la demanda es esencial el conocimiento de la demanda de los usuarios, cómo son satisfechas, patrones de uso consuntivo y no consuntivo, el nivel de servicio que es experimentado por los usuarios y sus beneficios (Batchelor, Hoogeveen, Faures, & Peiser, 2017).

Los modelos de simulación hidrológica son las herramientas utilizadas para investigar los procesos hidrológicos, que van desde pequeñas captaciones hasta modelos globales. Cada modelo tiene sus propias características únicas y sus respectivas aplicaciones. Algunos de ellos son completos y emplean la física de los procesos hidrológicos subyacentes, y se distribuyen en el espacio y el tiempo. También, cada modelo tiene varios inconvenientes, como la falta de facilidad de uso, los grandes requisitos de datos, la ausencia de declaraciones claras de sus limitaciones, etcétera (Gayathri, Ganasri, & Dwarakish, 2015). Sorooshian, Sharma y Wheeler (2008) clasificaron los modelos como los basados en eventos y los continuos. Los primeros producen información solo para periodos de tiempo específicos, mientras que los últimos producen información continua. Una de las clasificaciones más importantes es el modelo empírico, los modelos conceptuales y los modelos de base física.

Según Islam (2011), en resumen, los modelos para la gestión de recursos hídricos se pueden clasificar como: 1) modelos de optimización basados en maximización de beneficios económicos; 2) modelos de optimización basados en minimización de costos de flujo, y 3) modelos de gestión de recursos hídricos basados en sistemas dinámicos. Mayer y Muñoz-Hernández (2009) afirman que la simulación y optimización son los dos enfoques principales para el modelado de cuencas hidrográficas. En la simulación, el comportamiento de los recursos hídricos se simula en función de un conjunto de reglas que rigen las asignaciones de agua y la operación de la infraestructura; mientras que en la optimización, las

asignaciones se optimizan en función de una función objetiva y restricciones asociadas.

La gestión integrada de un sistema de recursos hídricos socioeconómico y medioambiental ha suscitado una atención considerable, y ha demostrado ser más adecuada para la gestión sostenible de los recursos hídricos. Los programas informáticos diseñados para el Soporte de Decisión (Sistemas de Soporte de Decisión, SSD), involucran los recursos hídricos totales y el consumo de agua, con contenido complejo y amplia cobertura. Hoy día, los SSD que ya se han desarrollado incluyen principalmente técnicas de optimización, la técnica de resolución de conflictos y sistemas adaptativos complejos (Fan, Xu, Chen, Li, & Tian, 2020).

Las herramientas de SSD proporcionan soluciones operativas para ayudar a los responsables de la formulación de políticas a abordar los complejos problemas ambientales del socio-ecosistema a diversas escalas. Además de las funciones centrales que apuntan al análisis de decisiones, por lo general incluyen capacidades para modelar y, en algunos casos, también para la gestión de procesos participativos. Estas herramientas de SSD pueden proporcionar el marco operativo para la integración de metodologías y enfoques de modelado de simulación, planeación participativa y análisis de decisión (Giupponi & Sgobbi, 2013).

En la zona noroeste de España (Galicia) existen algunos estudios en cuencas similares que sirven de referencia para el presente trabajo. En específico, se habla de los trabajos de Samper *et al.* (2005); Raposo, Molinero y Dafonte (2012) en Galicia Costa, y Samper y Pisani (2013) en

la subcuenca del río Valiñas. La diferencia encontrada en los resultados se debe posiblemente a que existe una distinta composición geológica entre las subcuencas de Vilasouto y Ponte Pena, en donde casi la mitad (47 %) pertenece a grupo de “cuarcitas, pizarras, areniscas y limotitas”, a diferencia de la subcuenca de Vilasouto, donde este mismo grupo tiene solamente un 13.79 %, que resalta la aparición de calizas, ya que esto modifica los parámetros hidrogeológicos del acuífero.

El objetivo de este trabajo fue plantear una metodología a través del ensamble de los modelos matemáticos e informáticos Visual-Balan y AQUATOOL, para estimar el balance hídrico en la subcuenca alta del río Cabe y evaluar las garantías de abastecimiento en sus demandas de agua. A pesar de que en la actualidad existe una planificación hidrológica en esta área de estudio, los reportes oficiales aún muestran un sesgo con la realidad de los flujos de agua al sobrestimar las cantidades de recursos hídricos.

Materiales y métodos

Área de estudio

Al noroeste de España, en la Comunidad Autónoma de Galicia (CAG), dentro la municipalidad de Lugo, se encuentra el Sistema de Explotación Cabe (SEC), que se refiere al aprovechamiento resultante de la subcuenca del río Cabe, la cual forma parte de la Demarcación Hidrográfica del Miño-Sil (DHMS). La superficie de la cuenca del SEC es de 735.18 km². Durante su recorrido de 54.94 km recibe afluentes, siendo importantes el Mao, con 49.47 km de longitud; Cinsa y Carabelos, con 15.69 y 11.35 km de longitud, respectivamente. En todo el SEC hay 200.65 km de longitud de masas de agua y 925.05 km de longitud de cauces (MAGRAMA, 2015). Uno de los elementos importantes para la gestión de los recursos hídricos dentro del SEC es el embalse de Vilasouto, que cuenta con una capacidad de 21 Hm³, ubicado en la parte alta de la subcuenca. En la Figura 1 se muestra la ubicación del SEC dentro de la DHMS y su punto de unión con el río Sil.



Figura 1. Ubicación de la subcuenca del río Cabe dentro de la Demarcación Hidrográfica Miño-Sil.

El modelo de simulación hidrológica utilizado en el actual Plan Hidrológico (PH) es el modelo conceptual y casi distribuido SIMPA (Sistema Integrado para la Modelación del proceso Precipitación Aportación), actualizado por el Centro de Estudios Hidrográficos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (Cedex), de España. En la Tabla 1 se muestran los datos estadísticos básicos de las variables hidrológicas según lo reportado por la CHMS en el PH vigente. La precipitación media anual es de 1 041.59 mm y una aportación anual media de 386.42 hm³/año, mientras que otras variables hidrológicas para el SEC son evapotranspiración potencial de 604.1 mm/año; evapotranspiración real de 518.33 mm/año; recarga de acuíferos de

158.66 $\text{hm}^3/\text{año}$; caudal superficial de 226.60 $\text{hm}^3/\text{año}$ y caudal subterráneo de 159.82 $\text{hm}^3/\text{año}$; caudal total de 386.42 $\text{hm}^3/\text{año}$.

Tabla 1. Estadísticos básicos de precipitación y aportación medios para el SEC, serie 1980/81-2011/12. Fuente: CHMS (2015).

Datos anuales	Precipitación (mm/año)	Año ocurrencia	Aportación anual ($\text{hm}^3/\text{año}$)	Año ocurrencia
Valor mínimo	638.9	2011/2012	140.22	2011/2012
Valor medio	1 041.59		386.42	
Valor máximo	1 751.33	2000/2001	841.86	2000/2001
Coef. var.	0.23		0.40	
Coef. sesgo	0.81		0.86	
Autocorrelación	-0.19		-0.22	

En la información reportada en el PH, los usos del agua se dividen por “Unidades de Demanda” de tipo urbana (incluye doméstico, industrial, municipal, comercial y turismo), agrícola, ganadera y recreacional. En la Tabla 2 se pueden observar las cantidades de agua que se extraen de las diversas fuentes para satisfacer los 17.78 hm^3 anuales de todas las demandas en el SEC estimadas al 2012. La mayoría del agua se obtiene de fuentes superficiales debido a la disponibilidad natural de agua en la región.

Tabla 2. Origen del abastecimiento en el SEC. Adaptado de CHMS (2015).

Sistema de explotación	Origen de agua en el sistema de explotación			
	Superficial (hm ³ /año)	Subterránea (hm ³ /año)	Manantial (hm ³ /año)	Vol. total (hm ³ /año)
Cabe	14.13	2.43	1.22	17.78

Subcuenca alta del río Cabe

El área de estudio específica para este trabajo de investigación es en realidad una simplificación o reducción del SEC (de 735.18 km²), la cual se trata de la Subcuenca Alta del Río Cabe (SARC), con un área de 426.34 km², que es aproximadamente la mitad del SEC. El punto de la delimitación (salida) de la SARC está dentro de la ciudad de Monforte de Lemos, Lugo. El área de estudio se ha establecido a este punto debido a que la última estación de aforo (EA1765) se encuentra a 4 km aguas arriba en la periferia de la ciudad de Monforte de Lemos. En consecuencia, no es posible calibrar un modelo hidrológico después de la estación de aforo y realizar una simulación hidrológica en áreas sin calibrar generaría resultados con una alta incertidumbre que no son posibles contrastar con alguna realidad. Con este fundamento y por tratarse de Monforte de Lemos, una ciudad con relevancia en la zona, se estableció el punto de

salida de la SARC en las coordenadas latitud 42° 31' 16.23" N y longitud 7° 30' 56.48" O. La demanda de recursos hídricos por cada tipo en la SARC se muestra en la Figura 2, información que ha sido extraída y adaptada del PH vigente. Se puede observar que la unidad de demanda urbana (UDU) es de 4.2 hm³, que representa el 24 % del total y se mantiene relativamente estable a lo largo del año. Lo mismo se observa para las demandas ganaderas (UDG), demanda recreacional (UDP 10), que representan el mínimo de la demanda, al ser del 3 % cada una; la unidad de demanda agrícola (UDA), que representa el 70 %, con 12.1 hm³, y tiene el mayor consumo en los meses de mayo a septiembre y un consumo nulo de noviembre a febrero.

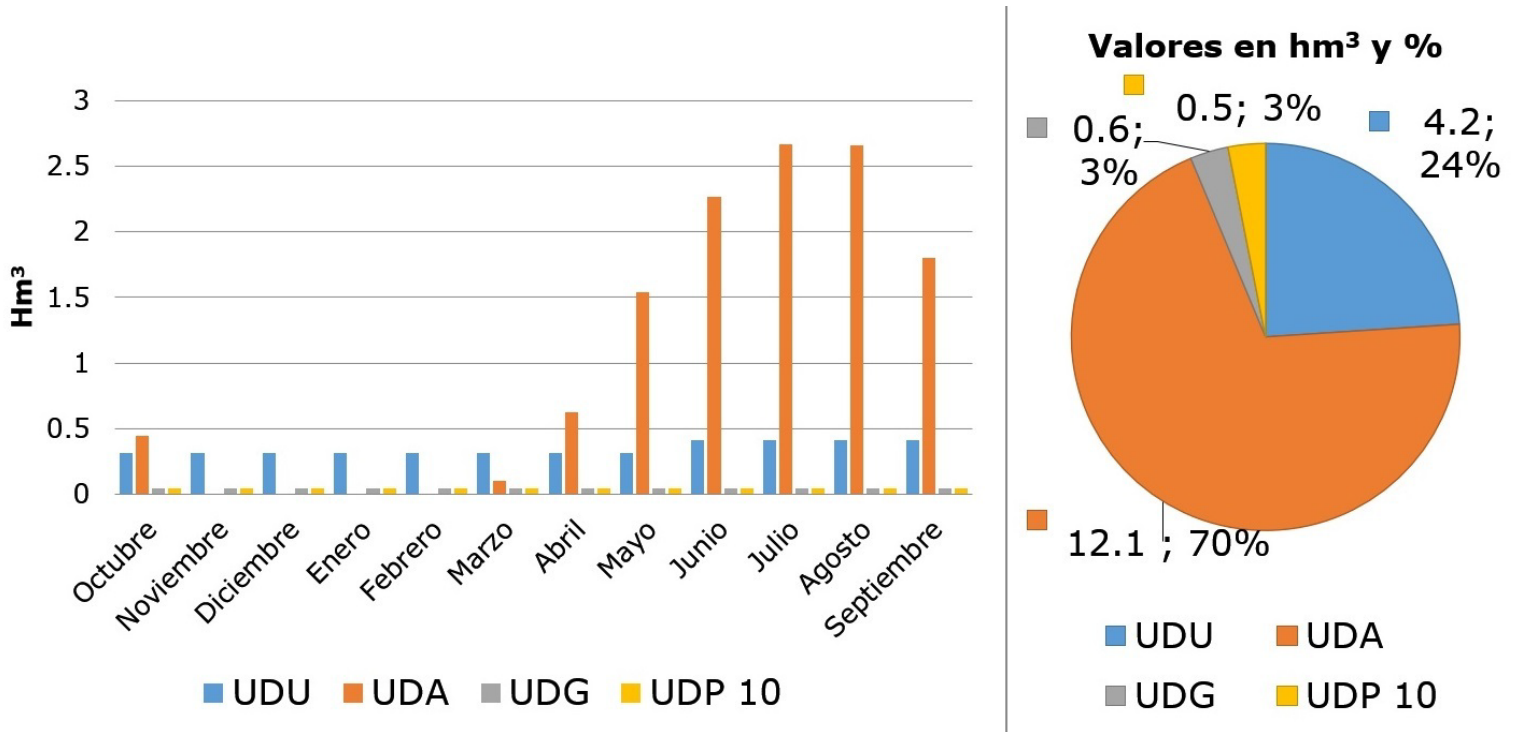


Figura 2. Usos de los recursos hídricos por cada unidad de demanda en la SARC. Adaptado de CHMS (2015).

Metodología

La metodología consiste en un ensamble de métodos matemáticos y de *software* especializados para la simulación de procesos del ciclo hidrológico y gestión de recursos hídricos. En la Figura 3 se muestra el inicio del proceso y el orden en que el ensamble de modelos se va

realizando para llegar a los resultados parciales y final del propósito de este trabajo, donde cada fase está diferenciada en distinto tono de azul; los pasos enmarcados en rojo representan la información de entrada obtenida de diversas fuentes consideradas como oficiales; los enmarcados en negro hacen mención a *software*; en amarillo, a modelos matemáticos, y los recuadros verdes representan resultados que se consideran relevantes para el propósito de este trabajo de investigación. El proceso de la Figura 3 inicia con la definición de las subcuencas que componen el área de estudio, continuando con la obtención de las series completas de los parámetros meteorológicos requeridos por el *software* de modelación hidrológica; después trata de la simulación hidrológica con el *software* Visual-Balan, el cual se alimenta de la información de las dos fases anteriores, además de los todos parámetros físicos de la cuenca y de los datos de las estaciones de aforo. Así, Visual-Balan realiza una primera validación de la simulación hidrológica que, en caso de no cumplir los criterios, necesitará una recalibración de los parámetros físicos de la cuenca hasta obtener una validación aceptable. Para evaluar el comportamiento de modelos, Moriasi *et al.* (2007) recomiendan el número de eficiencia de Nash y Sutcliffe (2003), el coeficiente de determinación (R^2) y la raíz media del error cuadrático (RMSE). Como resultado se obtienen las series de datos de aportación de recursos hídricos para cada subcuenca en el área de estudio. La parte que corresponde a las simulaciones con el *software* AQUATOOL requiere de la información de los flujos de agua dentro del sistema, como son las demandas, retornos, bombeos y red de distribución, entre otros aspectos, para posteriormente generar la red de flujos de agua para el escenario en

estudio. De acuerdo con Andreu, Solera, Capilla y Ferrer (2007), el módulo de SIMGES de AQUATOOL se alimenta de la red de flujos y de las series de datos de aportación, realizando la simulación de la gestión para abastecer las demandas dentro del sistema. Los elementos de almacenamiento (como embalses y reservorios) dentro del sistema de flujos sirven de puntos de control para valorar el correcto funcionamiento del modelo, a fin de poder comparar los niveles simulados en el embalse con los medidos. Como resultado final se obtiene un panorama de la contabilización de los recursos hídricos desde antes de su utilización hasta la distribución y evaluación del abastecimiento de las demandas para el periodo de tiempo evaluado.

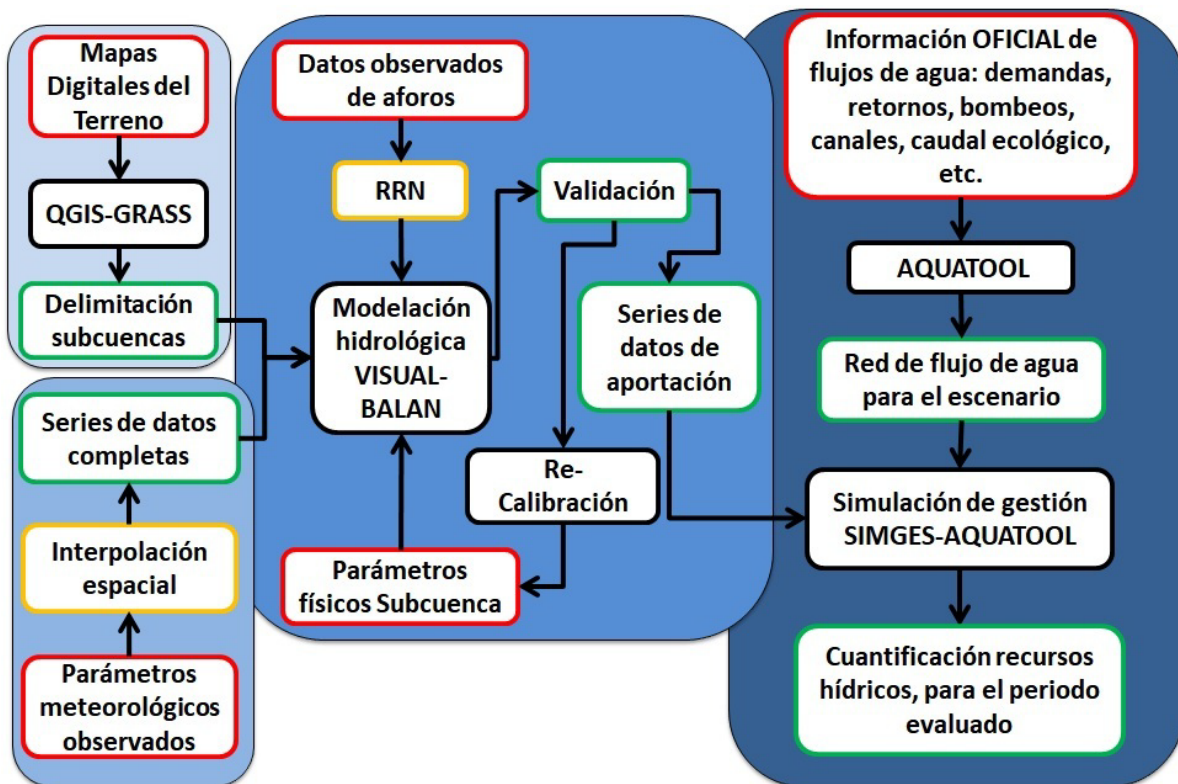


Figura 3. Proceso de ensamble de la metodología.

Para la definición de las subcuencas en el área de estudio se requirió información geoespacial del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de España y del *software* QGIS para procesar y obtener los mapas de delimitación de las subcuencas en el área de estudio. Con la información de los modelos digitales del terreno (MDT) se trabajaron con el *software* de información geográfica QGIS y las herramientas de GRASS. A través del IGN se obtuvieron del centro de descargas la información de los mapas con Sistema de Coordenadas de Referencia (SCR) ETRS89, de MDT05 LIDAR (Modelo Digital del Terreno y Laser Imaging Detection and Ranging) y BTN25 (Base Topográfica Nacional).

Dentro de los complementos de QGIS que se usaron en este trabajo están las utilidades y herramientas de GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) y GRASS-PROJECT (Geographic Resource Analysis Support System).

En lo que se refiere a las series de datos meteorológicos diarios de temperatura media (T media), precipitación (Pr) y evapotranspiración de referencia (ET_0) para la SARC, se obtienen según los resultados del trabajo de Rangel-Parra (2019), donde se detallan los cálculos de la estimación por interpolación espacial para las variables climáticas mencionadas.

Los parámetros físicos del suelo del área de estudio se obtuvieron en los mapas interactivos de propiedades del suelo de Galicia del Departamento de Edafología y Química agrícola de la Universidad de

Santiago de Compostela (USC, 2018). Los parámetros físicos que no han sido posibles obtener de la bibliografía se ajustaron mediante la herramienta de calibración automática que ofrece el Visual-Balan.

Los datos de aforos observados en los ríos Mao (principal tributario) y Cabe se obtuvieron del anuario del Cedex (Cedex, 2018) para las estaciones de Ribas Altas, Ponte Pena y embalse de Vilasouto. Para la estación de Ponte Pena corresponden al periodo completo de 2007 a 2017; mientras que para la estación en Ribas Altas solo se utilizaron los caudales de invierno de 2006-2017 (cuando no se realiza la actividad de regadío), pues durante el verano se hacen extracciones para regadío que no están debidamente registradas, por lo que sería posible aplicar la restitución al régimen natural. Por último, para el caso del embalse de Vilasouto, sí fue posible y necesario aplicar una restitución al régimen natural (RRN), al contar con los datos diarios del nivel del embalse.

De acuerdo con Lopez-Garcia (1993), para calcular el caudal con restitución al régimen natural, la ecuación general tiene el siguiente planteamiento:

$$N = S + T + B - V - Q - R + E \pm A \quad (1)$$

En donde N es el caudal de un río en régimen natural para el periodo; S , el caudal aforado; T , el caudal derivado o trasvasado por tomas aguas arriba (hacia fuera de la cuenca); B , el caudal detraído por bombeo en acuíferos conectados; V , el caudal vertido por usos aguas

arriba; Q , el caudal trasvasado de otras cuencas (hacia dentro la cuenca); R , el caudal aportado por recarga adicional en acuíferos; E , el caudal evaporado en embalses y masas de agua nuevas, y A es el caudal almacenado o liberado por embalses.

Para este trabajo en particular y aplicado al embalse de Vilasouto, se ha modificado la ecuación para adaptarla al caso en particular, quedando de la siguiente forma. El caudal total con RRN en el punto de salida del embalse se calcula con la siguiente ecuación de balance hídrico para el almacenamiento:

$$A_i = A_{i-1} + P + N - Evap. - Q_{salida} \quad (2)$$

O para la caudal total:

$$N = (A_i - A_{i-1}) + Evap. + Q_{salida} - P \quad (3)$$

En donde para el día i , A_i es el almacenamiento en el embalse para cierto día y A_{i-1} es el almacenamiento del día anterior en unidades de volumen/tiempo que corresponde al día i ; $Evap.$, la evaporación en la superficie del embalse; Q_{salida} , el caudal de salida del embalse, y P es la precipitación que cae en el área del embalse (se multiplica por el área del embalse). La evaporación ($Evap.$) del embalse de Vilasouto se estimó como una fracción de la evapotranspiración de referencia (ET_0) calculada por interpolación espacial para el centro del embalse. La ecuación

reportada por la Asociación Americana de Ingenieros Civiles (ASCE, 1996) es:

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (4)$$

Hay que agregar el área del embalse para tener el volumen de toda la evaporación en el embalse para el día correspondiente:

$$K_c (ET_0 * A) = Evap. \quad (5)$$

En donde el valor de K_c es de 0.75 según reportado por ASCE para el agua en superficie abierta. Se considera que ET_c correspondería a la evaporación de la superficie de agua ($ET_c = Evap.$); A es el área del embalse, y ET_0 es la evapotranspiración de referencia en el embalse.

El *software* Visual-Balan realiza balances de agua en el suelo edáfico en la zona no saturada y en el acuífero, utilizando un entorno interactivo de entrada de datos y posproceso de resultados. Los términos fundamentales del balance son las entradas por precipitación y riegos; las salidas por escorrentía superficial, evapotranspiración, interceptación, flujo hipodérmico y flujo subterráneo; la variación del contenido de humedad del suelo, de la zona no saturada y del nivel de agua en el acuífero. Estos resultados se pueden comparar con datos disponibles de niveles y aforos (Samper, 1999).

Los criterios que utiliza AQUATOOL para evaluar los fallos en las garantías de abastecimiento han sido los de la Instrucción para la Planificación Hidrológica (IPH) (IPH, 2008) del gobierno de España para demandas urbanas y agrícolas (criterio UTAH DWR): “Para la demanda urbana, se considera fallo cuando en el déficit en un mes es superior al 10 % de la demanda mensual. Para la demanda agrícola, se considera fallo cuando el déficit en un año es superior al 50 % de la demanda anual. (D.A.). Se considera fallo cuando en dos años consecutivos la suma del déficit es superior al 75 % de la D.A., y se considera fallo cuando en diez años consecutivos la suma de déficit es superior al 100 % de la D.A.” (Solera-Solera, Paredes-Arquiola, & Andreu-Álvarez, 2015).

Resultados

En la Figura 4 se muestra el resultado del mapa generado en QGIS, en donde la Subcuenca Alta del Río Cabe (SARC) se representa en bordeado rojo con 426.34 km², así como de las tres subcuencas internas: Ribas Altas, 350.79 km²; Ponte Pena, 35.24 km², y Vilasouto, 49.24 km². Las subcuencas se establecieron en referencia a las estaciones de aforos disponibles. La parte sombreada del mapa corresponde a la subcuenca baja del río Cabe (308.84 km², que no se incluye en este trabajo), la cual se une al río Sil hacia el sur. Las coordenadas geográficas WGS84 de sus centroides son SARC 42° 36′ 13″ N y 7° 25′ 2.9″ W; Ribas Altas 42° 37′ 40″ N y 7° 23′ 40″ W; Embalse Vilasouto 42° 41′ 10″ N y 7° 21′ 12″ W;

por último, Ponte Pena $42^{\circ} 39' 10''$ N y $7^{\circ} 18' 37''$ W, con proyección ETRS89/UTM zona 29 (EPSG:25829).

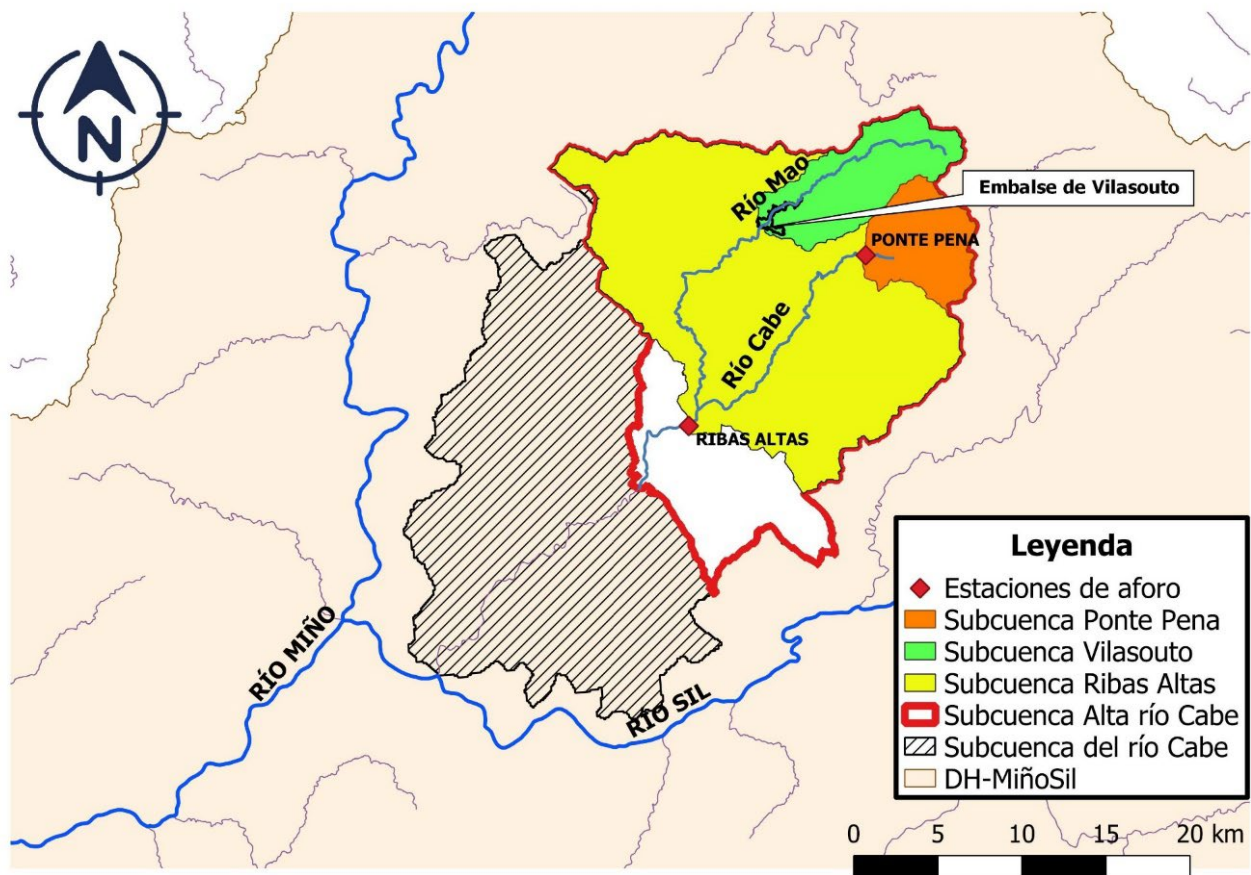


Figura 4. Resultado de la generación de subcuencas dentro de la Subcuenca del río Cabe dentro.

Respecto al cálculo de la restitución al régimen natural (RRN), en la Figura 5 se puede observar el flujo promedio diario de salida en el embalse de Vilasouto restituido. Al graficar este caudal con RRN, se observó que

después del día 20/06/2013 de los 11 años hidrológicos había un comportamiento irregular negativo en los caudales (círculos indicados) debido al error en la estimación de los caudales de salida, y en sus registros y validación. Por tal motivo, solo se utilizaron los datos anteriores a esta fecha de la irregularidad, que corresponde del 01/10/2006 al 19/06/2013, como referencia para calibrar el modelo hidrológico Visual-Balan (puntos azules de la Figura 6) en esta subcuenca.

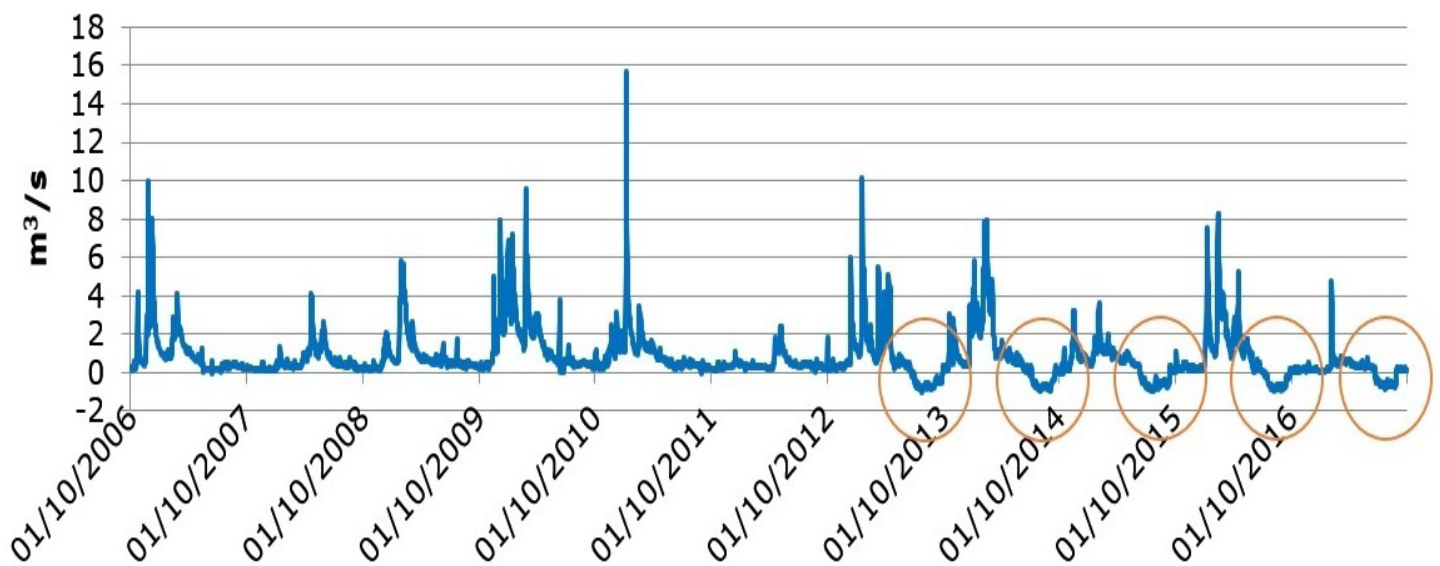


Figura 5. Resultado de la RRN en el embalse de Vilasouto, flujo promedio por día.

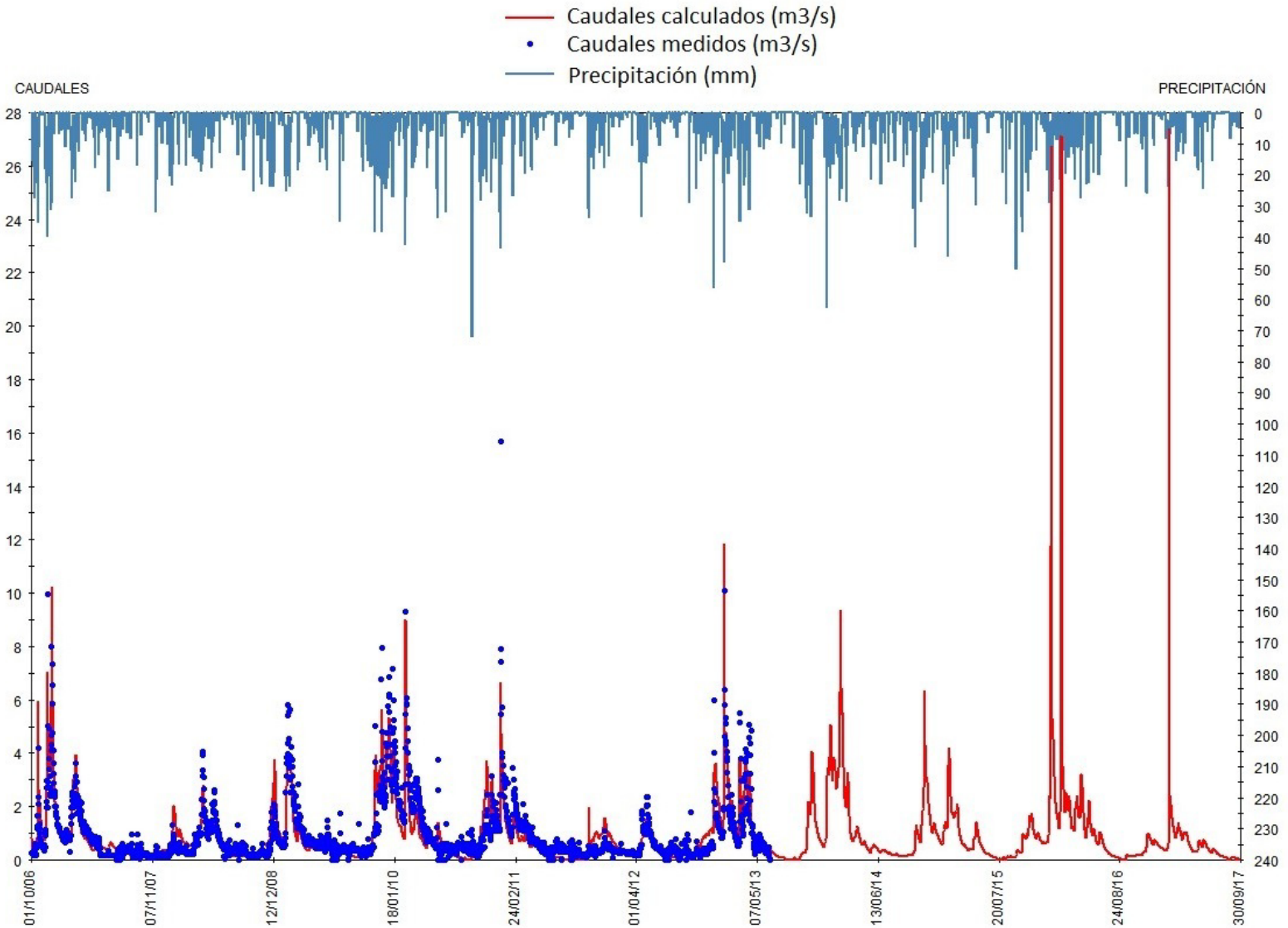


Figura 6. Comparación de la calibración en Vilasouto con los caudales observados y simulados.

En la Figura 6 se muestra el resultado de la calibración en la subcuenca de Vilasouto, comparando los caudales observados y

simulados después de haber eliminado el periodo con flujos negativos explicado en la Figura 5.

En la Tabla 3 se muestra el resultado de aportaciones media anual por subcuenca en la SARC para el periodo 2006-2017; la subcuenca de Vilasouto, 29.71 hm³/año (12 %); Ponte Pena, 24.26 hm³/año (8 %); Ribas Altas, 132.32 hm³/año (62 %); el área restante entre Ribas Altas y el punto de salida de la SARC aporta 29.88 hm³/año (18 %), para un gran total de 216.36 hm³/año. Según lo reportado por la CHMS, el SEC completo aporta 386 hm³/año, por lo que los 216.36 estimados en este trabajo para el SARC representan el 56 % de lo estimado para el SEC.

Tabla 3. Aportación de recursos hídricos por subcuenca de la SARC.

Subcuenca	Aportación (hm ³ /año)	%
Vilasouto	29.71	12
Ponte Pena	24.26	8
Ribas Altas	132.32	62
Remanente SARC	29.88	18
Total en la SARC	216.36	100

Después de estimar el caudal con RRN, se hizo la simulación hidrológica con Visual-Balan en la subcuenca de Vilasouto de forma iterativa y recalibrando los parámetros físicos del suelo, utilizando las

ayudas de las herramientas incluidas en Visual-Balan para análisis de sensibilidad y autocalibración. Los parámetros físicos del suelo del área de estudio se obtuvieron en los mapas interactivos de propiedades del suelo de Galicia del Departamento de Edafología y Química Agrícola de la Universidad de Santiago de Compostela (USC, 2018). En la Figura 6 se muestran los caudales simulados con el modelo calibrado y los caudales observados de la base de datos del anuario del Cedex, en donde se obtuvo un valor del coeficiente de Nash-Sutcliffe-Efficiency (NSE) de 0.69. Los caudales simulados se ajustan adecuadamente a la magnitud y tendencias de los datos observados. Por otra parte, el resultado de la simulación hidrológica para Ribas Altas obtuvo una validación de NS de 0.82, y para la subcuenca de Ponte Pena se tuvo un valor de NS de 0.38. Moriasi *et al.* (2007), en su publicación, dieron una clasificación de interpretación a los valores del NSE, los cuales se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Interpretación de los valores del criterio Nash-Sutcliffe-Efficiency.

Calificación del rendimiento	NSE
Muy buena	$0.75 < \text{NSE} < 1$
Buena	$0.65 < \text{NSE} < 0.75$
Satisfactoria	$0.5 < \text{NSE} < 0.65$
Insatisfactoria	$\text{NSE} \leq 0.5$

Fuente: Moriasi *et al.* (2007).

El NSE obtenido en la subcuenca de Ponte Pena es el más bajo de las tres subcuencas simuladas, no obstante, solo representa el 8 % en las aportaciones del área de estudio, como se muestra en la Tabla 3. Por otra parte, no se encontró información detallada de los parámetros geológicos y de flujos subterráneos para mejorar la validación de la simulación en Ponte Pena. Para aumentar la consistencia de la calibración obtenida para la SARC (y observar el impacto de resultado obtenido en Ponte Pena), se contrastó la distribución de flujos con otros dos estudios hidrológicos dentro de la zona de Galicia (Raposo *et al.*, 2012) para la Demarcación Hidrográfica, y para el río Valiñas (Samper & Pisani, 2013). En la Tabla 5 se puede observar la similitud en la importancia de los componentes hidrológicos. Además, en la Figura 7 se muestra la distribución gráfica entre los dos resultados de flujos del caso del río Valiñas y la SARC. La coincidencia de tales comparaciones respalda los resultados obtenidos para el área de estudio de este trabajo y la representatividad en la calibración obtenida con Visual-Balan.

Tabla 5. Comparación de los resultados de Visual-Balan para la SARC con dos estudios en la misma zona de Galicia.

Parámetros hidrológicos (valores anuales)	Río Valiñas Samper y Pisani (2013)		Galicia Costa Raposo <i>et al.</i> (2012)		SARC	
Precipitación (mm)	1 081	100 %	1 545.44	100 %	994.32	100 %
Interceptación (mm)	163	15.08 %	118.8	7.69 %	93.21	9.68 %
Escorrentía superficial (mm)	5	0.46 %	92.7	6 %	16.82	1.69 %
ET_0 (mm)	928	-	-	-	997.00	-
ETR (mm)	376	34.78 %	357.8	23.2 %	391.02	39.3 %
Recarga en tránsito (mm)	536	-	-	-	490.28	-
Flujo hipodérmico (mm)	437	40.43 %	592.3	38.3 %	396.17	39.8 %
Recarga al acuífero (mm)	99	-	385	24.9 %	94.38	-
Flujo subterráneo (mm)	98	9.07 %	-	-	94.38	9.49 %
Caudal total (mm)	541	50.05 %	-	-	507.37	51.0 %

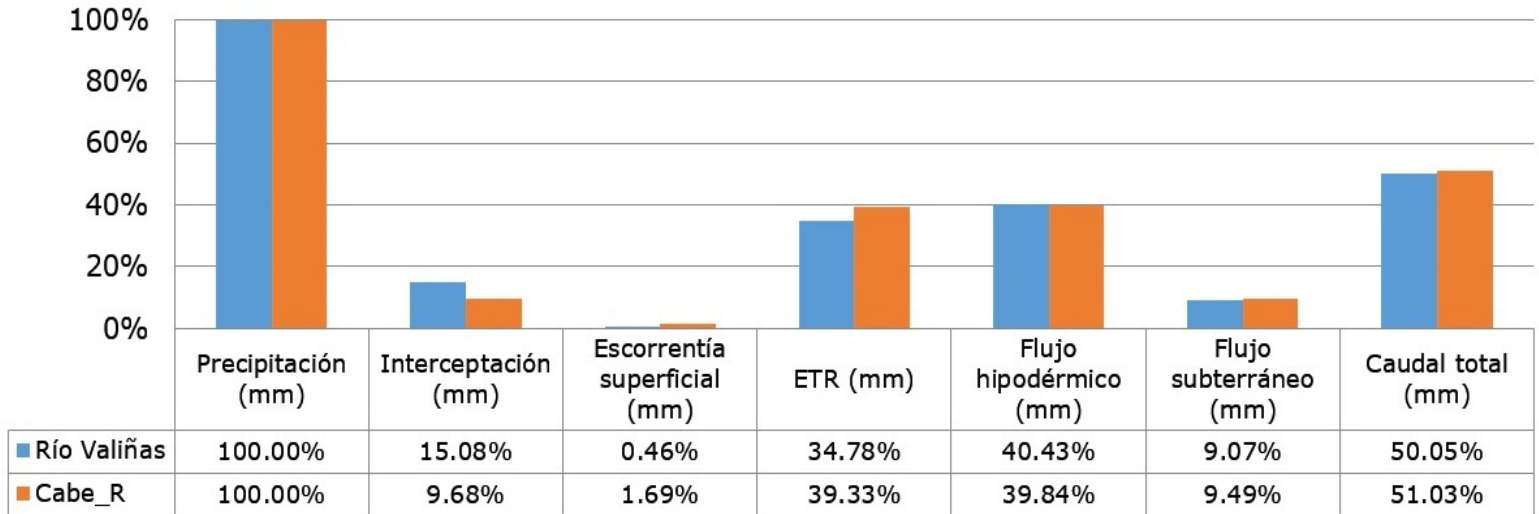


Figura 7. Comparación de los resultados de las variables hidrológicas la SARC y la subcuenca del río Valiñas.

Una de las características de Visual-Balan es la capacidad de realizar una doble calibración frente a caudales superficiales y niveles piezométricos. Sin embargo, en lo que respecta a los recursos hídricos subterráneos, no se cuenta con información sobre los datos de niveles piezométricos en el área, información que es fundamental para mejorar los resultados de calibración del modelo hidrológico-geológico. De nuevo Raposo *et al.* (2012), y Samper y Pisani (2013) coinciden en sus trabajos con el reto de calibrar el modelo hidrológico al trabajar en un área de estudio con variaciones en la geología de la cuenca, y la heterogeneidad de las características de almacenamiento y transmisión del agua subterránea en rocas de tipo cristalino.

El nivel de reserva observado en el embalse de Vilasouto fue considerado el punto de referencia para evaluar la simulación de flujos de AQUATOOL contra el comportamiento real del sistema. En la Figura 9 se muestran la gráficas entre los niveles observados y simulados por AQUATOOL para la SARC, así como los niveles de la simulación llevados a cabo y reportados por la CHMS en el PH vigente. Se puede observar una clara mejor aproximación a la realidad de los resultados de este trabajo que los reportados en el PH.

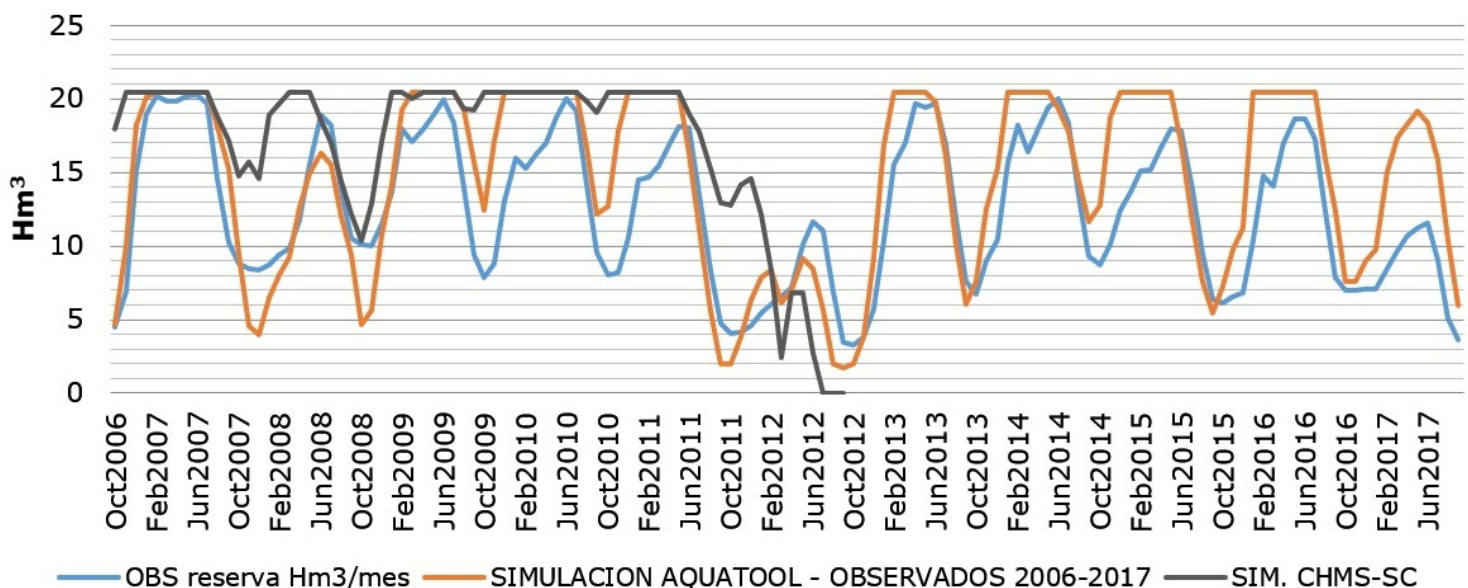


Figura 9. Comparación entre los niveles del embalse de Vilasouto simulados con AQUATOOL y niveles observados.

La diferencia encontrada entre los resultados de la CHMS y los de este trabajo recae en las estimaciones de aportación de recursos hídricos. Mientras que los datos utilizados por la CHMS fueron generados por el *software* SIMPA, en este trabajo se utilizó la información de los parámetros meteorológicos reportados en Rangel-Parra (2019) derivados de los datos de MeteoGalicia. La simulación hidrológica en Visual-Balan implica un proceso de mayor complejidad que el modelo SIMPA, por lo que las aportaciones generadas por SIMPA están sobrestimadas y al ser simuladas en AQUATOOL resultan en una ausencia de fallos en las garantías.

Por último, para los fallos en la garantía de abastecimiento se utilizaron los criterios del IPH preestablecidos en AQUATOOL. En la Tabla 6 se muestra el resumen de los resultados de los fallos para el periodo simulado 2006-2017. Se encontró un total de 10 fallos para las demandas; el caudal ecológico es el de mayor número con tres; la demanda ganadera en Bóveda presenta dos, y por último las que presentan un fallo fueron la demanda agrícola del valle de Lemos, la demanda ganadera en Monforte, la demanda agrícola en Monforte, la demanda agrícola en Bóveda y la demanda recreacional UDP10. Para las urbanas (UDU) no se presenta ningún fallo. Es importante señalar que a las UDU se les ha dado prioridad sobre el resto de las demandas. A pesar de los fallos encontrados por los criterios del IPH, la garantía en porcentaje volumétrico se mantiene arriba de 99 %. Las fechas de los fallos coinciden con los periodos de menor nivel de reserva en el embalse de Vilasouto.

Tabla 6. Fallos en la garantía de abastecimiento para las demandas de la SARC en la simulación con AQUATOOL.

Demanda	Núm. de fallos	Garantía (%)	Garantía Vol. (%)	Max. déficit, un mes (hm³)	Max. déficit, dos meses (hm³)
UDA_3301_Valle de Lemos	1	99.2	99.1	0.034	0.034
UDG Ficticia 2301 y 2302 Bóveda	2	98.5	99.4	0.021	0.023
UDG ficticia 2303 Monforte de Lemos	1	99.2	99.4	0.012	0.012
UDA ficticia 2303 Monforte de Lemos	1	99.2	99.0	0.011	0.011
UDA Ficticia 2301 y 2302 Bóveda	1	99.2	99.3	0.045	0.045
UDP 10	1	99.2	99.5	0.032	0.032
Caudal Ecológico	3	97.7	99.3	1.857	2.073

Conclusiones

La aplicación conjunta de los resultados de caudales obtenidos con el modelo hidrológico Visual-Balan y del modelo de soporte a la decisión AQUATOOL produce valores más próximos a los valores registrados en el embalse de Vilasouto que los reportados en el Plan Hidrológico vigente para el río Cabe. Por lo tanto, la mejora en la simulación del ciclo hidrológico de este trabajo se considera una contribución para los futuros planes hidrológicos en la Demarcación Hidrográfica del Miño-Sil.

La coincidencia en magnitud y distribución de los flujos de los componentes hidrológicos con otros dos estudios en la misma región respalda los resultados de la calibración del modelo hidrológico Visual-Balan.

En la simulación con AQUATOOL se encontró que existen fallos en las garantías de abastecimiento para algunas demandas de agua que no están identificadas en el Plan Hidrológico. Estos fallos coinciden con los niveles bajos en el embalse de Vilasouto. El reporte en el Plan Hidrológico se ve afectado por la sobrevaloración de los recursos hídricos del modelo SIMPA, que se reflejan en el embalse con niveles mayores a los reales, resultando en menor estimación de fallos en el abastecimiento de las demandas de agua.

La ausencia de datos de niveles piezométricos es una limitación en el momento de calibración de modelos hidrológicos, sobre todo en una

zona como la de Galicia y su naturaleza de hidrogeológica. Sin embargo, con los datos disponibles actualmente es posible lograr una calibración funcional para simular los flujos de agua superficiales.

Contar con este ensamble de modelos Visual-Balan y AQUATOOL calibrado y validado abre la posibilidad de extender las investigaciones en la subcuenca alta del río Cabe para evaluar los posibles efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos. Con la ayuda del ensamble realizado en este trabajo se puede abordar con mayor énfasis cualquier tema en la gestión de los recursos hídricos y el abastecimiento para las demandas de agua.

Agradecimientos

Este trabajo se realiza bajo el financiamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) de México para beca para doctorado en el extranjero otorgada al primer autor, el cual también forma parte de la tesis doctoral.

Quisiéramos agradecer al jefe de la oficina de planificación hidrológica de la confederación hidrográfica Miño-Sil, D. Carlos Guillermo Ruíz del Portal Florido, por los datos suministrados para la realización de este trabajo.

Referencias

- Andreu, J., Solera, A., Capilla, J., & Ferrer, J. (2007). Modelo SIMGES de Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos, incluyendo Utilización Conjunta. Versión 3.00. Manual del Usuario. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- ASCE, American Society of Civil Engineers. (1996). Hydrology Handbook (2nd ed.). New York, USA: Library of Congress Catalog.
- Batchelor, C., Hoogeveen, J., Faures, J., & Peiser, L. (2017). Water accounting and auditing. A sourcebook. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Cedex, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. (20 de 03 de 2018). Anuario de aforos. Modalidades de consulta. Madrid, España: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Recuperado de <http://ceh-flumen64.cedex.es/anuarioaforos/default.asp>
- CHMS, Confederación Hidrográfica del Miño-Sil. (2015). Plan hidrológico del ciclo 2015-2021. Madrid, España: Confederación Hidrográfica del Miño-Sil.
- Diamond, J. (2005). Collapse: How societies choose to fail or succeed. New York, USA: Viking.
- Fan, M., Xu, J., Chen, Y., Li, D., & Tian, S. (2020). How to sustainably use water resources. A case study for decision support on the water utilization of Xinjiang, China. *Water*, 12, 3564. DOI: 10.3390/w12123564

- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2019). Water accounting and auditing. Recuperado de <http://www.fao.org/land-water/water/water-management/water-accounting/en/>
- Gayathri, K. D., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A review on hydrological models. *Aquatic Procedia*, (4), 1001-1007.
- Giupponi, C., & Sgobbi, A. (2013). Decision support systems for water resources management in developing countries: Learning from experiences in Africa. *Water*, 798-818. DOI: 10.3390/w5020798
- GWP & INBO, Global Water Partnership & International Network of Basin Organization. (2009). Manual para la gestión integrada de recursos hídricos en cuencas. Londres, Reino Unido: Global Water Partnership, International Network of Basin Organization.
- IPH, Instrucción para la Planificación Hidrológica. (2008). Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica. Madrid, España: Boletín Oficial del Estado.
- Islam, Z. (2011). Literature review on water resources modeling. Alberta, Canada: Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta.
- Lopez-Garcia, J. (1993). Restitución de datos de aforo al régimen natural. En: Andreu, J. (ed.). *Conceptos y métodos para la planificación hidrológica* (pp. 69-74). Barcelona, España: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería.

- MAGRAMA. (2015). Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Miño-Sil (2015-2021), Capítulo 4. Ourense, España: Confederación Hidrográfica del Miño-Sil, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, de España.
- Mayer, A., & Muñoz-Hernández, A. (2009). Integrated water resources optimization models: An assessment of a multidisciplinary tool for sustainable water resources management strategies. *Geography Compass*, 3(3), 1176-1195.
- Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R., & Veith, T. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900
- Nash, J., & Sutcliffe, J. (2003). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290. DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6
- ONU, Organización de las Naciones Unidas. (2018). UN Water. Recuperado de <http://www.unwater.org/water-facts/>
- Rangel-Parra, R. (2019). Determinación de la cantidad de recursos hídricos para la gestión a nivel de cuenca por modelación. Estudio de aplicación a las cuencas de río Cabe (Lugo) y río Colorado (B.C., México). Lugo, España: Universidad de Santiago de Compostela.
- Raposo, J., Molinero, J., & Dafonte, J. (2012). Parameterization and quantification of recharge in crystalline fractured bedrocks in Galicia-Costa (NW Spain). *Hydrology and Earth System Sciences*, (16), 1667-1683.

- Samper, J. (1999). Manual del usuario del programa Visual Balan 2.0. Coruña, España: Universidade da Coruña.
- Samper, J., & Pisani, B. (2013). Balance hidrometeorológico e hidroquímico para el estudio de los recursos hídricos y la evolución de la calidad química del agua en pequeñas cuencas de Galicia. Estudios en la Zona No Saturada del Suelo, XI. La Coruña, España. Recuperado de http://zonanosaturada.com/zns13/publications_files/5.4.pdf
- Samper, J., García-Vera, M., Pisani, B., Alvares, D., Varela, A., & Losada, J. (2005). Modelos hidrológicos y sistemas de información geográfica para la estimación de los recursos hídricos: aplicación de GIS-Balan a varias cuencas españolas. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo, VII. La Coruña, España. Recuperado de <http://soda.ustadistancia.edu.co/enlinea/eduvirtual/Cuencas/maestria/docs/seminv/Lec-3Samperetal.pdf>
- Solera-Solera, A., Paredes-Arquiola, J., & Andreu-Álvarez, J. (2015). AQUATOOL+, Manual de usuario. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Sorooshian, S., Sharma, K., & Wheeler, H. (2008). Hydrological modelling in arid and semi-arid areas. New York, USA: Cambridge University Press.
- USC, Universidad de Santiago de Compostela. (25 de febrero, 2018). Propiedades dos Solos Galicia. Santiago de Compostela, España: Universidad de Santiago de Compostela. Recuperado de <http://rgis.cesga.es/index.html>