

**XX CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
LIMA, PERÚ, 23 AL 27 DE ABRIL DEL 2018**

**EL SISTEMA MINERVE PARA LA MODELIZACIÓN DE CRECIDAS EN
EL CANTON DE VALAIS EN SUIZA: ANÁLISIS DE LA CUENCA DE
GRANDE-EAU**

Javier García Hernández¹, Alain Foehn², Javier Fluixá-Sanmartín¹ y Bastien Roquier¹

¹*Centre de recherche sur l'environnement alpin, CREALP, Sion, Suiza*

²*École Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL, Lausana, Suiza*

javier.garcia@crealp.vs.ch, alain.foehn@epfl.ch, javier.fluixa@crealp.vs.ch, bastien.roquier@crealp.vs.ch

RESUMEN:

Durante las últimas 4 décadas, la cuenca vertiente del río Ródano, aguas arriba del lago Lemán en Suiza, ha sufrido tres grandes crecidas que han causado daños importantes debido a su desbordamiento. Por este motivo se puso en marcha el desarrollo y la implementación del sistema MINERVE, para mejorar la información hidrometeorológica durante las crecidas teniendo en cuenta la red de embalses y centrales hidroeléctricas existentes.

El presente artículo presenta un análisis de una cuenca de dicho sistema, llamada Grande-Eau, con una superficie de 153.9 km² y una altitud que varía de 378 a 3'200 m s.n.m. El modelo hidrológico realizado se ha calibrado con diferentes datos de entrada y diferentes procedimientos para estudiar cómo cambian la calidad del modelo. La lluvia espacializada aporta una mejora sustancial en los resultados durante los periodos de fuertes lluvias, mientras que el uso de la cobertura de nieve observada aporta una mejora parcial en algunos periodos del año.

ABSTRACT:

During the last 4 decades, the basin of the Rhone River, upstream of Lake Lemman in Switzerland, has suffered three major floods that have caused significant damage due to its overflow. For this reason, the development and implementation of the MINERVE system was put in place, in order to improve hydrometeorological information during floods, taking into account the network of reservoirs and existing hydropower plants.

This article presents an analysis of a basin of this system, called Grande-Eau, with an area of 153.9 km² and an altitude that varies from 378 to 3'200 m asl.. The hydrological model has been calibrated with different input data and different procedures to study how the quality of the model improves. The spatialized precipitation provides a substantial improvement in the results during periods of heavy rainfall, while the observed snow cover provides a partial improvement in some periods of the year.

PALABRAS CLAVES: *modelización hidrológica; calibración, RS MINERVE, previsión hidrológica operacional, gestión de crecidas.*

INTRODUCCIÓN

La primera fase del proyecto MINERVE empezó en 2002, con el desarrollo de un modelo hidrológico-hidráulico capaz de modelizar cuencas complejas. En 2011, dicho desarrollo se plasmó en un sistema operacional para la previsión y la gestión de crecidas en el río Ródano.

El sistema MINERVE es actualmente la base para las advertencias por crecidas en tiempo real que utilizan los órganos competentes del Cantón de Valais para la toma de decisiones, tales como el vaciado preventivo de embalses o la evacuación de núcleos urbanos.

La cuenca vertiente superior del río Ródano (Figura 1) se sitúa en los Alpes suizos, en una zona montañosa con una importante presencia de grandes glaciares y comprende la mayor parte del Cantón de Valais y una parte del Cantón de Vaud. La superficie de la cuenca es de 5'524 km², incluyendo 658 km² de glaciares, y su elevación varía entre 372 y 4'634 m s.n.m.

El sistema MINERVE (García Hernández et al., 2014; Tobin, C., 2012; Jordan, 2007), operacional en dicha cuenca, explota observaciones meteorológicas (estaciones meteorológicas y radar de la Oficina Nacional de Meteorología, MeteoSwiss), observaciones de caudal (de la Oficina Federal de Medio Ambiente, OFEV), datos de gestión de los embalses y de las centrales hidroeléctricas, y también previsiones meteorológicas (COSMO-1 y COSMO-E) generadas por MeteoSwiss.

MINERVE proporciona, a partir de estos datos, previsiones hidrológicas en todas las cuencas vertientes del sistema. A continuación, un sistema de advertencias genera un informe de avisos de crecidas basado en la evolución de la situación hidrológica y en los umbrales de advertencia definidos en los principales puntos de control de la cuenca.

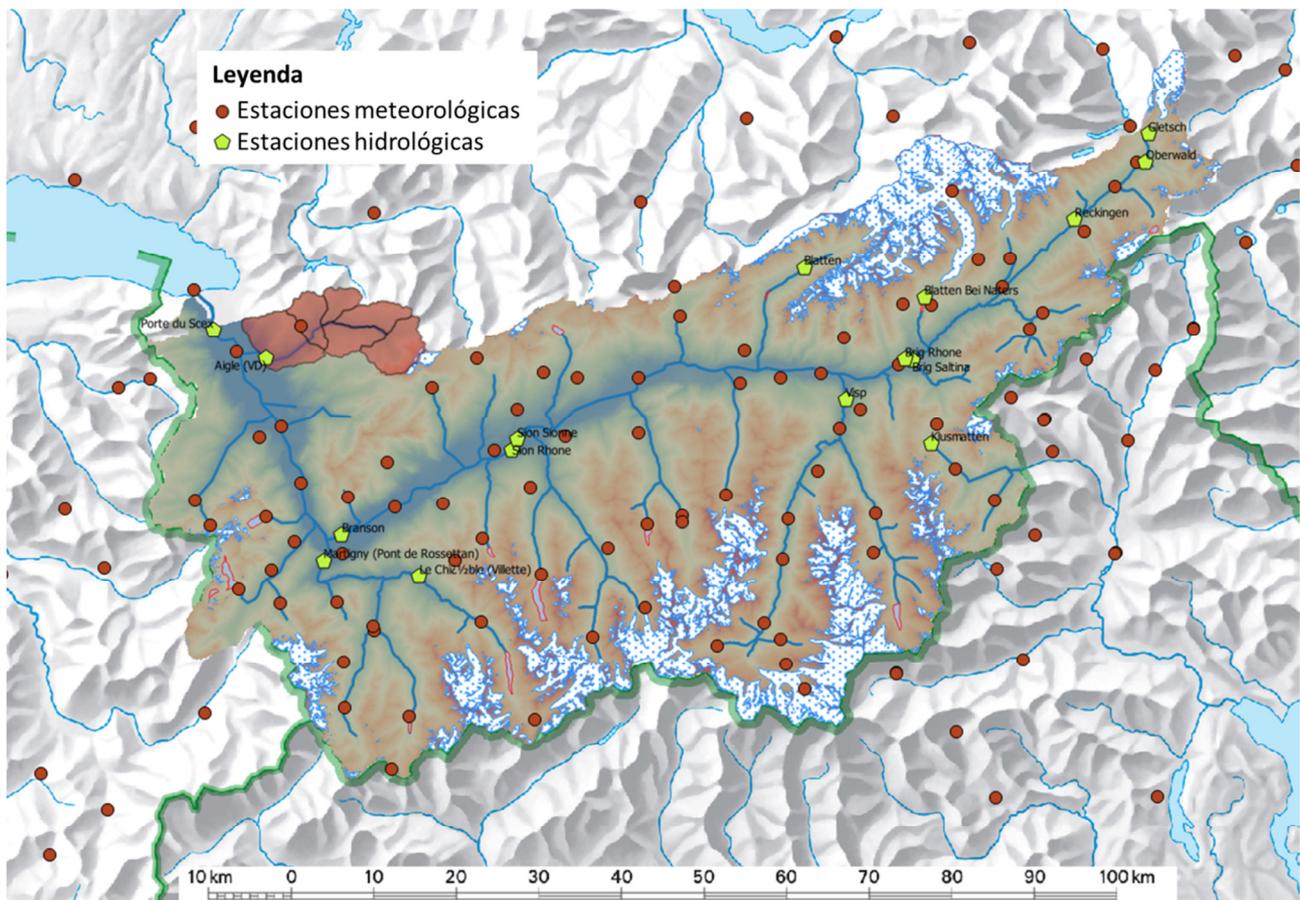


Figura 1.- Cuenca completa del río Ródano aguas arriba del lago Lemán, con la cuenca de estudio (Grande-Eau) en rojo.

CUENCA DE ESTUDIO

Dentro de este gran sistema se encuentra la cuenca de estudio analizada en el presente artículo, llamada Grande-Eau. Dicha cuenca tiene una superficie total de 153.9 km^2 , de los cuales 153.1 son no glaciares y 0.8 glaciares. La altitud de la cuenca (Figura 2) varía de 378 a 3200 m s.n.m. y no existen grandes infraestructuras hidráulicas, con lo que el caudal registrado se puede definir como “natural”. El caudal medio de los últimos 30 años en la estación Aigle, situada en el punto de desagüe de la cuenca, es de $4.54 \text{ m}^3/\text{s}$, y el caudal máximo registrado durante dicho periodo es de $66.54 \text{ m}^3/\text{s}$ (4 de julio de 2007 a las 04:00).

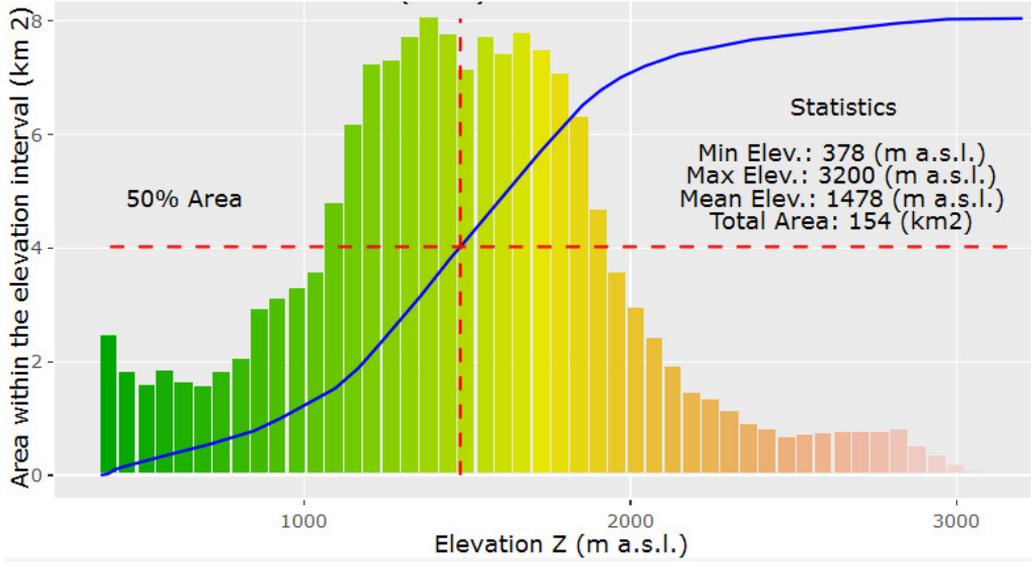


Figura 2.- Curva hipsométrica e histograma altitudinal de la cuenca Grande-Eau.

MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA

Para esta cuenca se han utilizado los modelos hidrológicos semi-distribuidos GSM y SOCONT (para más detalles sobre los modelos, por favor consulte García Hernández et al., 2018), cuyos esquemas de funcionamiento se presentan en la Figura 3.

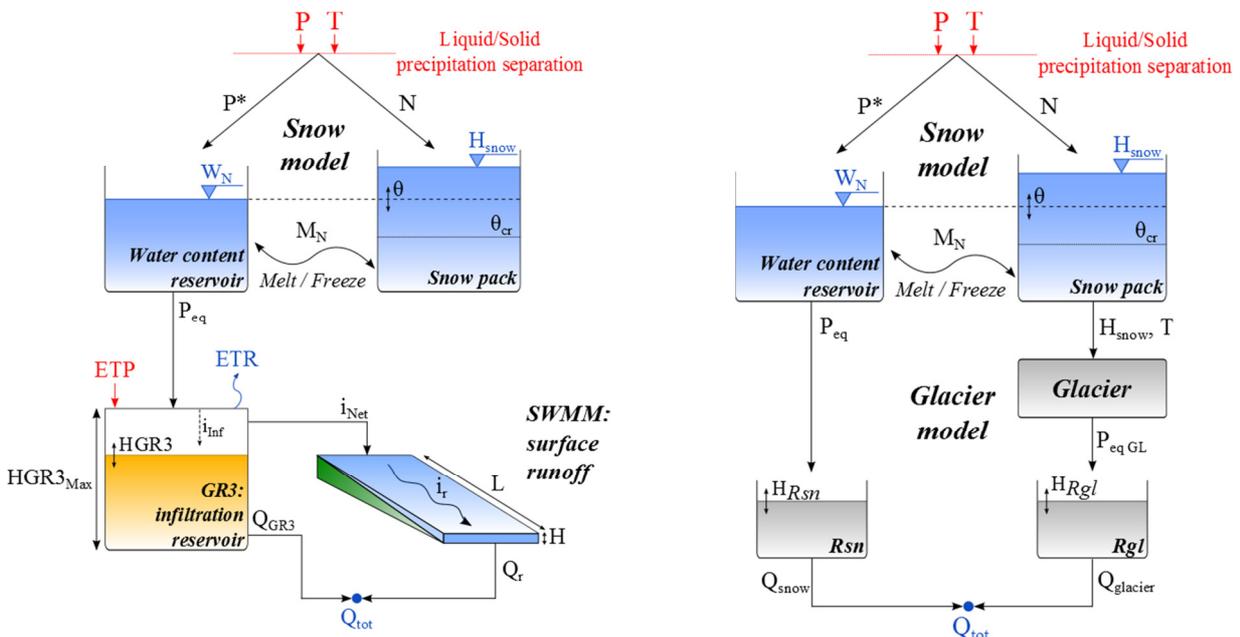


Figura 3.- Modelos GSM (izquierda) y SOCONT (derecha). Fuente: García Hernández et al., 2018.

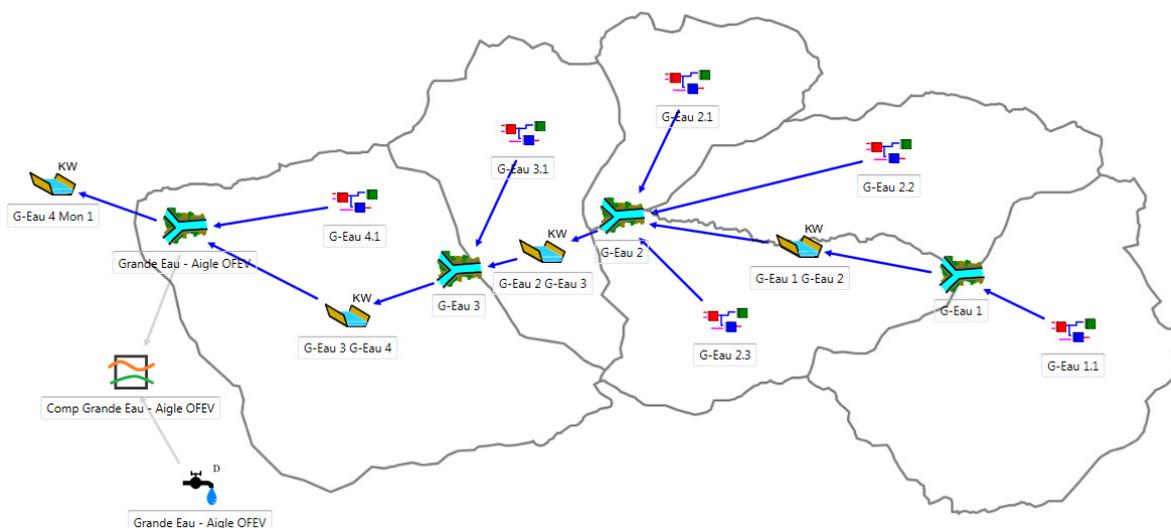


Figura 4.- Cuenca Grande-Eau y subdivisión en 6 sub-cuencas, cada una con un conjunto de bandas de altura reunidas por sub-modelo.

Para la modelización hidrológica de la cuenca, ésta se ha dividido en 6 sub-cuencas (Figura 4), separadas en 23 bandas de altitud no glaciares y 2 bandas glaciares. El uso de bandas altitudinales permite capturar correctamente los procesos hidrológicos relacionados con la temperatura, tales como la fusión de nieve o de glaciares, facilitando asimismo el cálculo de precipitación, temperatura y ETP en cada una de ellas.

CALIBRACION Y VALIDACIÓN

En este estudio se aplicaron 3 métodos diferentes para la calibración de los parámetros del modelo, con el objetivo de saber cuál proporciona mejores resultados y poder compararlos entre sí.

El primer método utiliza las estaciones meteorológicas disponibles como inputs, con una calibración en función del caudal. Cabe mencionar que únicamente se dispone de una estación meteorológica dentro de la cuenca de estudio (Figura 1), perteneciente a la red de estaciones de la empresa MeteoGroup Switzerland AG.

El segundo método también se basa en la calibración en función del caudal, pero con un input meteorológico distinto. Al disponer únicamente de una sola estación meteorológica dentro de la cuenca, se utilizó un nuevo producto de MeteoSwiss llamado CombiPrecip (Sideris et al, 2014) que combina los datos de todas las estaciones meteorológicas disponibles con datos de radar, para proporcionar un ráster horario con una malla de 1km*1km.

Finalmente, a partir de dicho producto CombiPrecip como input, se aplicó un tercer método de calibración teniendo en cuenta la cobertura de nieve basada en el producto MODIS de la NASA (Parajka et al., 2014; Dionisio Calado et al., 2014) para calibrar el parámetro de fusión nival grado-día en función de dicha cobertura. A continuación, se calibraron el resto de parámetros del modelo hidrológico en función de datos de caudal observado, como en el método precedente.

El periodo de datos disponibles para este estudio comienza el 1 de septiembre del 2010 y termina el 1 de septiembre de 2017. La calibración se realizó del 1 de septiembre de 2014 al 1 de septiembre de 2017, a paso de tiempo horario, y la validación en el periodo restante.

Para la modelización y optimización de los parámetros se utilizó la plataforma RS MINERVE (Foehn et al., 2018; García Hernández et al., 2018), que se basa en la programación orientada a objetos y permite el modelado hidrológico e hidráulico de acuerdo con un esquema conceptual semi-distribuido. Además de procesos hidrológicos concretos tales como deshielo, derretimiento de glaciares, flujo superficial y subterráneo debido a la infiltración, esta plataforma también incorpora elementos de control hidráulico como, por ejemplo, embalses, compuertas, vertederos, derivaciones, confluencias, turbinas o bombas.

Método 1: calibración a partir de estaciones meteorológicas y basada en datos de caudal

En este caso se ha calibrado el modelo a partir de los datos de lluvia y temperatura provenientes de las estaciones meteorológicas disponibles, teniendo en cuenta que únicamente una sola estación se encuentra dentro de la cuenca de estudio y las otras se encuentran en las cuencas colindantes. Cada banda de altura calcula la lluvia promedio por cada paso de tiempo según una interpolación basada en el inverso de la distancia al cuadrado. El resultado de la calibración obtenida se puede ver en la Figura 5.

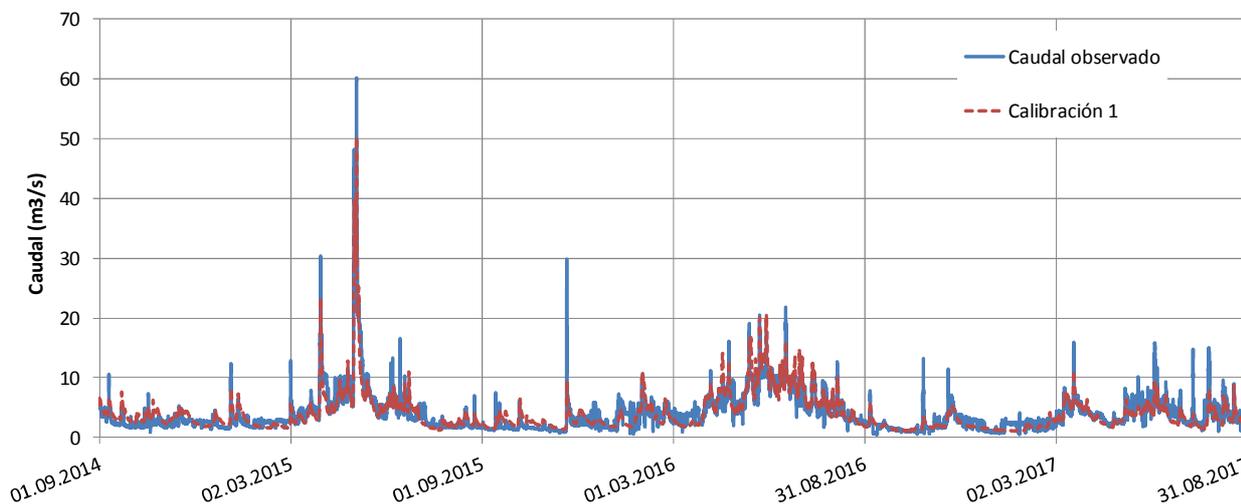


Figura 5.- Calibración del modelo basada en el método 1.

Método 2: calibración a partir de rásters de lluvia y basada en datos de caudal

En este caso se ha calibrado el modelo a partir del producto espacial CombiPrecip y datos de temperatura de las estaciones meteorológicas. El resultado obtenido se puede ver en la Figura 6 y a primera vista resulta similar al obtenido con el método 1.

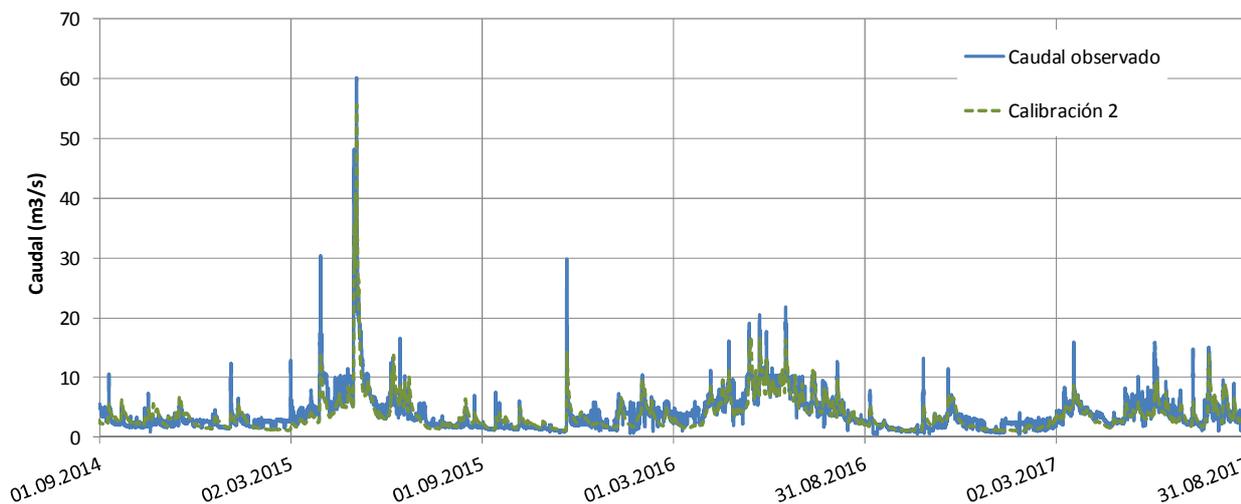


Figura 6.- Calibración del modelo basada en el método 2.

Método 3: calibración a partir de rásters de lluvia y basada en cobertura de nieve y datos de caudal

En este caso la calibración se ha realizado en 2 etapas. En la primera de ellas, se han calibrado los coeficientes grado-día del modelo de nieve, para a continuación calibrar todos los demás parámetros a partir del caudal observado. En la Figura 7 se aprecia esta primera calibración de los valores de grado-día. La calibración se realizó píxel a píxel y a continuación se calculó el

valor medio por banda de altura. En la Figura 8 se observa que dichos valores dependen considerablemente de la altitud del píxel analizado y de su orientación, lo que podría conllevar a la definición de patrones espaciales con un estudio más avanzado.

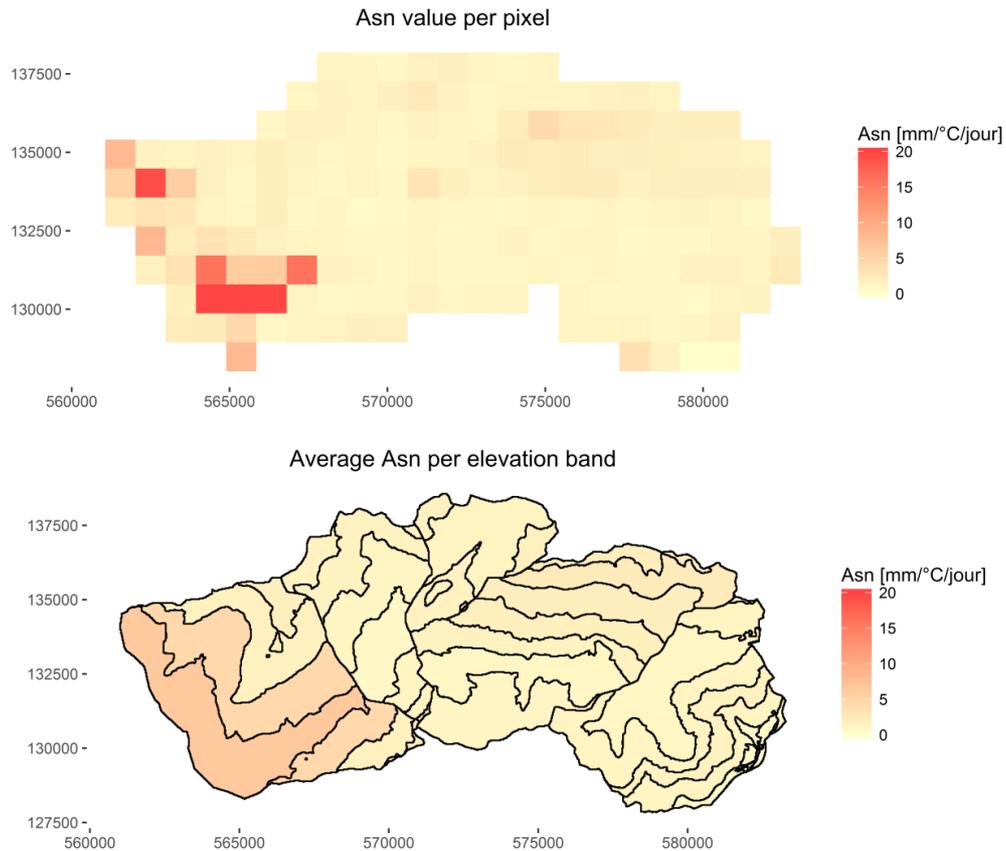


Figura 7.- Valores de coeficiente grado-día (Asn) del modelo de nieve. Parte superior, por píxel (según calibración inicial). Parte inferior por banda de altura, calculado por agregación de píxeles).

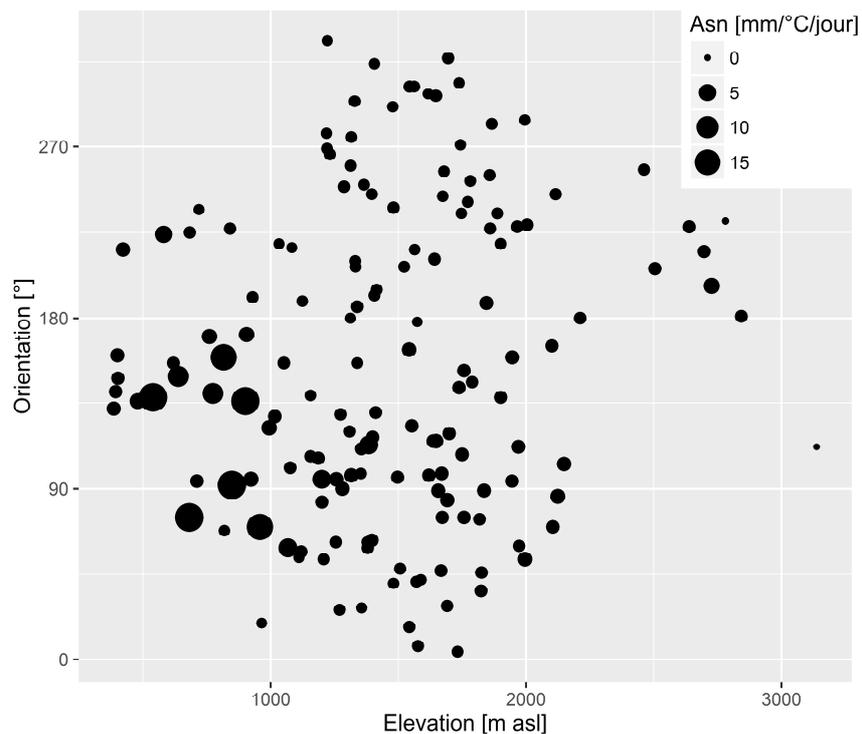


Figura 8.- Relación entre la altitud y la orientación con respecto a los valores grado-día (una orientación de 0° corresponde al Este, una de 90° al Sur, una 180° al Oeste y una de 270° al Norte).

El hidrograma producido en este caso se presenta en la Figura 9. El calibrado inicial de los parámetros grado-día con los datos de cobertura espacial de MODIS presenta a priori resultados similares a los precedentes.

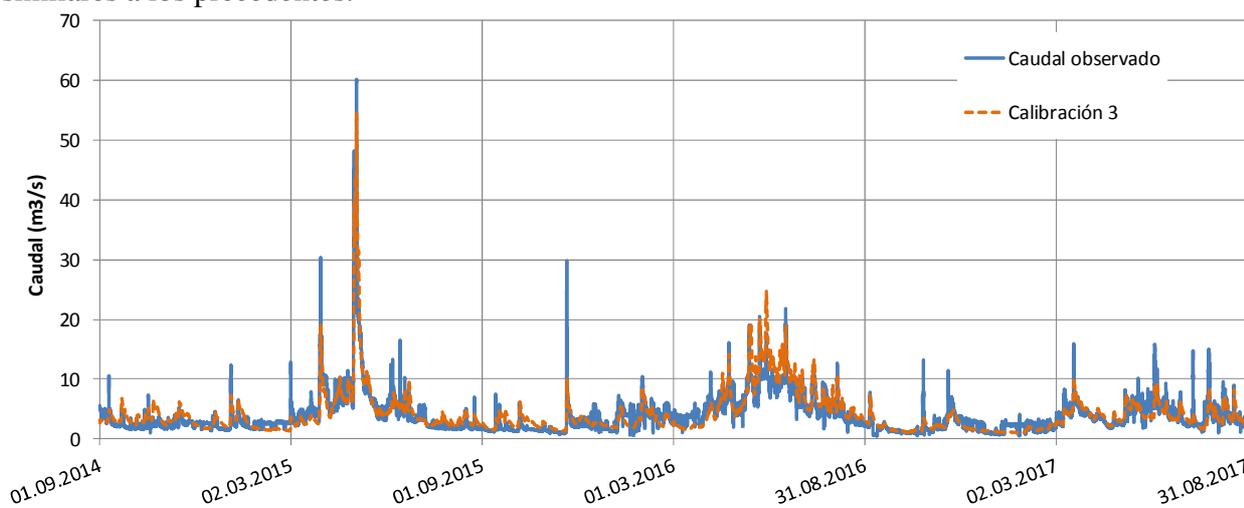


Figura 9.- Calibración del modelo basada en el método 3.

Resultados y comparación de métodos

En la Tabla 1 se pueden apreciar algunos valores de los indicadores de bondad tanto para el periodo de calibración como para el periodo de validación. En la Tabla 2 se pueden ver los principales parámetros calibrados en el modelo para cada uno de los métodos.

Tabla 1.- Indicadores de bondad para las distintas calibraciones y validaciones.

Método	Nash	Pearson	Kling-Gupta	RRMSE
Método 1: Calibración	0.83	0.91	0.90	0.35
Método 1: Validación	0.56	0.81	0.72	0.44
Método 2: Calibración	0.81	0.90	0.89	0.37
Método 2: Validación	0.63	0.83	0.77	0.40
Método 3: Calibración	0.78	0.90	0.88	0.40
Método 3: Validación	0.61	0.82	0.74	0.42

Tabla 2.- Valores de los parámetros calibrados en función del método seguido.

Método	Asn [mm/°C/d)	HGR3 [m]	KGR3	Kr
Método 1	3.37	0.22	0.0005	0.05
Método 2	1.95	0.22	0.0003	0.10
Método 3	[0.97-6.39] (ver Figura 7)	0.24	0.0003	0.10

Según estos resultados se puede concluir que todos los métodos de calibración ofrecen en general resultados similares. Ello indica que para la gestión del volumen de agua y balances hídricos anuales, cualquiera de los métodos propuestos es igual de válido. También es destacable la diferencia de los valores del parámetro grado-día (Asn) entre el método 1 y el método 2, lo que muestra una cierta incertidumbre generada en la modelización de la nieve. Si calculamos el coeficiente medio grado-día del método 3, ponderado por las diferentes superficies de cada banda de altura, se obtiene un valor de 2.80, lo que se encuentra entre los 2 precedentes.

Cuando el objetivo de la simulación son periodos de tiempo más cortos, las diferencias entre los métodos pueden ser más importantes, debido por una parte a los inputs y por otra a dichos valores de Asn. En efecto, durante los periodos de crecida, los métodos que utilizan CombiPrecip pueden reproducir más fielmente un evento gracias a la correcta repartición espacial de la lluvia, que puede no ser representada correctamente por las estaciones meteorológicas (ejemplo en

Figura 10, con los cúmulos de precipitación de la crecida de mayo del 2015). Ello implica un mejor cálculo del caudal punta en numerosas ocasiones, como en la mencionada crecida (Figura 11). Lo mismo sucede con los periodos de fusión de nieve (primavera y verano), donde el tercer método propuesto reproduce generalmente más fielmente el caudal de base gracias a una mejor gestión del manto de nieve durante el invierno.

Por otro lado, también se analizaron diferentes funciones objetivo, que optimizaban uno o varios indicadores de bondad al mismo tiempo (Nash, Pearson, Kling-Gupta y RRMSE con diferentes pesos variando de 0.125 a 0.5, haciendo siempre un total de 1), pero el resultado final se pudo apreciar que prácticamente no variaba.

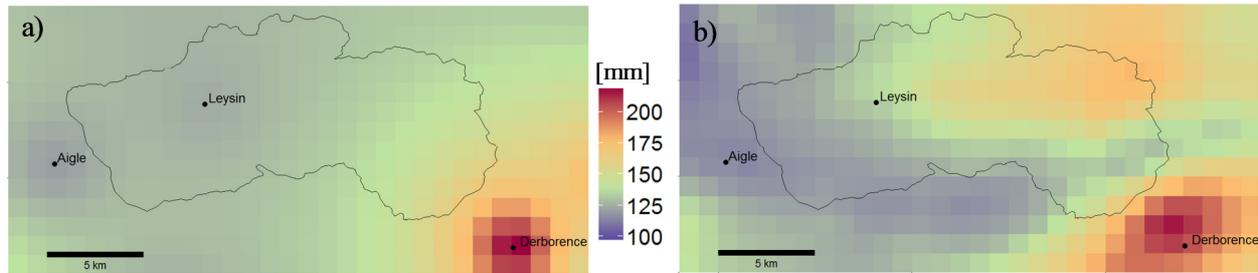


Figura 10.- Precipitación acumulada en mm en 4 días (desde el 1 de mayo de 2015 a las 00:00 al 5 de mayo 2015 a 00:00, estimado con en inverso de la distancia al cuadrado y con el método de krigage (estaciones combinadas con radar) para la cuenca de Grande-Eau. La escala de colores es la misma para las dos imágenes. Fuente: Foehn et al., 2016.

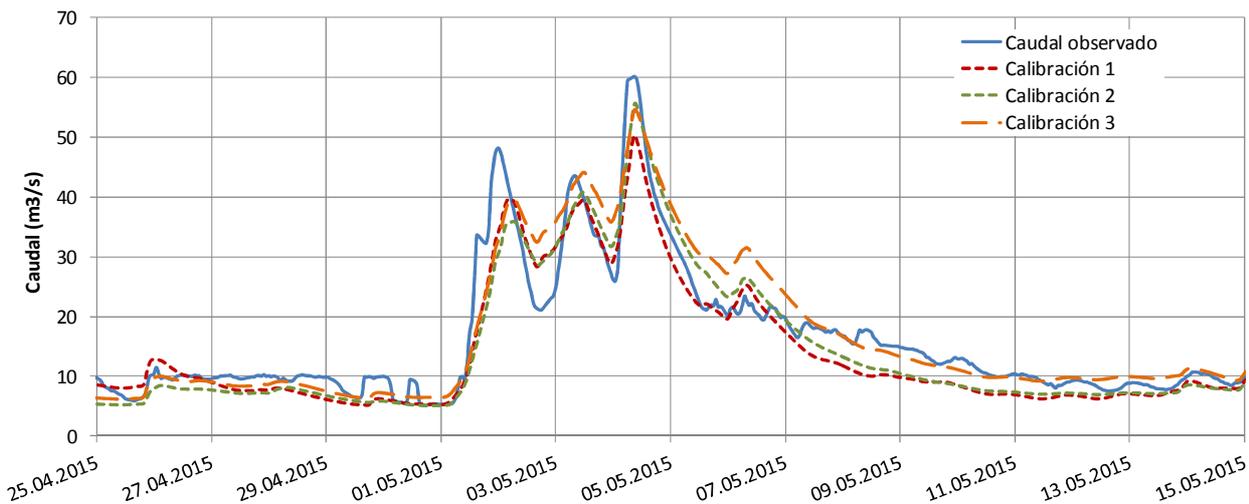


Figura 11.- Hidrogramas observado y simulados con los 3 métodos para la crecida de mayo de 2015.

CONCLUSIONES

En el presente artículo se presentan diversos métodos para la calibración de la cuenca Grande-Eau, situada en la cuenca del río Ródano, aguas arriba del lago Lemán. Dicha cuenca es una de las que dispone de menos estaciones meteorológicas de todo el sistema, y una topografía abrupta, con casi 3'000 m de desnivel entre la parte baja y la parte alta. Es por ello que se tomó como referencia para estudiar diferentes posibilidades de calibración, utilizando distintos inputs y siguiendo distintos procedimientos, para analizar cuál proporcionaba mejores resultados.

A pesar de esperar mejores resultados con los métodos 2 y 3 debido al carácter espacial dado a los inputs de lluvia, los resultados son similares al método 1 que utiliza únicamente estaciones de lluvia. Esto se pueden deber a que existe al menos una estación de lluvia dentro de la cuenca. Al realizar investigaciones suplementarias excluyendo dicha estación, y utilizando sólo las estaciones colindantes (fuera de la cuenca), se pudo observar que los resultados del método 1 eran muchos peores. Aun así, se puede concluir que tanto el método 2 como el método 3 proporcionan, para

diferentes periodos como las crecidas y los periodos de fusión de nieve, resultados claramente mejores que el primero, aunque dichos análisis todavía se tienen que profundizar para aplicarlo a todas las otras cuencas del sistema MINERVE.

Otro punto importante a destacar es que la calibración del coeficiente grado-día con datos de MODIS ofrece resultados similares (en términos de caudal simulado) a la calibración directamente con caudales observados. Esto puede ser de gran utilidad en cuencas que no dispongan de estación de medida de caudal. Además, se ha podido comprobar que los coeficientes grado-día del modelo de nieve eran, de media, relativamente similares tanto en el modelo realizado con los métodos 1 y 2 como en el modelo realizado a partir del método 3 (con calibración en base a MODIS), lo que refuerza la posibilidad de obtener cantidades de nieve para una cuenca a partir únicamente de la cobertura de nieve observada y puede ser una información muy valiosa para el cálculo del balance hídrico por temporada o estación del año.

REFERENCIAS

- Dionisio Calado, A., Micheloud, S., García Hernández, J., Foehn, A., Ornstein, P. and Claude, A. (2014).** Operational Snow Cover Mapping and Analysis in the Canton of Valais Based on MODIS Data. *Abstract Volume 12th Swiss Geoscience Meeting, Swiss Academy of Science (SCNAT), Fribourg, Switzerland, 366-367.*
- Foehn, A., García Hernández, J., Schaefli, B., De Cesare, G. and Schleiss, A. J. (2016).** Spatialization of precipitation data for flood forecasting applied to the Upper Rhone River basin. *International Conference Hydro 2016, Montreux.*
- Foehn, A., García Hernández, J., Roquier, B. and Paredes Arquiola, J. (2018).** RS MINERVE – User’s manual v2.9. *RS MINERVE Group, Switzerland.*
- García Hernández, J. (2011).** Flood management in a complex river basin with a real-time decision support system based on hydrological forecasts. *PhD Thesis N° 5093, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne.*
- García Hernández, J., Claude, A., Paredes Arquiola, J., Roquier, B. and Boillat, J.-L. (2014).** Integrated flood forecasting and management system in a complex catchment area in the Alps – Implementation of the MINERVE project in the canton of Valais. *Swiss Competences in River Engineering and Restoration, Schleiss, Speerli & Pfammatter Eds, 87-97. Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02676-6, doi:10.1201/b17134-12*
- García Hernández, J., Paredes Arquiola, J., Foehn, A. and Roquier, B. (2018).** RS MINERVE – Technical manual v2.12. *RS MINERVE Group, Switzerland.*
- Jordan, F. (2007).** Modèle de prévision et de gestion des crues. Optimisation des opérations des aménagements hydroélectriques à accumulation pour la réduction des débits de crue. *PhD Thesis N° 3711, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne.*
- Parajka, J. and Blöschl, G. (2008).** The value of MODIS snow cover data in validating and calibrating conceptual hydrologic models. *Journal of Hydrology, 358(3-4). 240–258. ISSN 00221694. doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.06.006.*
- Sideris, I. V., Gabella, M., Erdin, R. and Germann, U. (2014).** Real-time radar-rain-gauge merging using spatio-temporal co-kriging with external drift in the alpine terrain of Switzerland: Real-time radar-rain-gauge merging. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 140(680). 1097–1111. ISSN 00359009. doi: 10.1002/qj.2188.*
- Tobin, C. (2012).** Improving alpine flood prediction through hydrological process characterization and uncertainty analysis. *Thesis Report N°5416, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL, Lausanne.*