



Simulación y caracterización del régimen natural de descargas diarias en los andes del sur del Perú: región de Apurímac y Cusco

Simulation and characterization of natural regime of daily discharge in the southern Andes of Peru: Apurimac and Cusco regions

FERNANDO VEGAS GALDOS^{*1}, NORINA ANDRES², MASSIMILIANO ZAPPA², WALDO SVEN LAVADO CASIMIRO³ & NADINE HILKER²

¹Universidad de Cantabria, Santander, España

²Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL

³Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, SENAMHI, Casilla 11 1308, Lima 11, Perú

RESUMEN

El modelo hidrológico distribuido PREVAH (Precipitation–Runoff–Evapotranspiration–HRU model) se ha usado para simular los caudales diarios para el periodo 1993–2009 de seis cuencas andinas ubicadas en las regiones de Cusco y Apurímac: Vilcanota (Cusco); Alto Apurímac, Oropesa, Pachachaca, Santo Tomas y Velille (Apurímac). El rendimiento del modelo construido ha sido evaluado mediante comparación de los caudales observados y simulados a nivel diario en la cuenca de Vilcanota. Durante el periodo de calibración (1999–2004) se obtuvo valores en los coeficientes de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NS) de 0.89, Nash–Sutcliffe logarítmico (NSL) de 0.9 y un error volumétrico (VOL) de -0.7%. La poca variación en la eficiencia del modelo durante los periodos de validación 1993–1998 (NS: 0.89; NSL: 0.81 y VOL: 14.6) y 2005–2009 (NS: 0.86; NSL: 0.9 y VOL: -6.2) demuestra la estabilidad y la representatividad del conjunto de parámetros calibrados. Con el modelo calibrado se realizaron las simulaciones para las otras 5 cuencas no aforadas. Estos resultados fueron ajustados usando como referencia los datos de descarga media mensual publicada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Se obtuvo, para las 5 cuencas, una media de los coeficientes NS: 0.9, NSL: 0.92 y VOL: 9.4 para todo el período. El régimen de descargas se ha caracterizado mediante análisis de las series temporales de caudales (resultados numéricos del modelo) utilizando una amplia gama de índices hidrológicos (IH) que describen la magnitud, frecuencia, duración, la estacionalidad del flujo. Estos resultados confirman el potencial de configurar y usar PREVAH en cuencas no aforadas.

Palabras claves: Hidrología, modelo de escorrentía, modelo distribuido, PREVAH, Cusco, Apurímac.

ABSTRACT

A spatially semi-distributed hydrological model PREVAH (Precipitation–Runoff– Evapotranspiration–HRU model) was used to simulate the daily discharge over an eighteen-year period of 1993–2009 in six Andean basins: Vilcanota (Cusco); Alto Apurimac, Oropesa, Pachaca, St. Thomas and Velille (Apurimac). Calibration was done for Vilcanota basin in daily time steps. A Nash–Sutcliffe efficiency (NS) of 0.89, Nash and Sutcliffe logarithmic (NSL) of 0.9 and the Volume error (VOL) of -0.7 were achieved for the calibration period (1999–2004) in standard mode. The limited loss in efficiency when moving to the validation periods 1993–1998 (NS: 0.89 NSL: 0.81 VOL: 14.6) and 2005–2009 (NS: 0.86 NSL: 0.9 VOL: -6.2) proves the stability and representativity of the parameter sets identified. The simulation results for the other 5 ungauged basins were improved using monthly mean discharge data published by the Meteorological and Hydrological Service (SENAMHI). For these 5 basins a media of NS: 0.9, NSL: 0.92 and VOL: 9.4 were achieved for all the period. These results confirm the potential to setup and use PREVAH in ungauged basins. Finally, the flow regimes was characterized through analyses of discharge time series (numerical results) using a wide range of hydrologic indices (IH) describing magnitude, frequency, duration, seasonality of flow.

Keywords: Hydrology, runoff modeling, distributed model, PREVAH, Cusco, Apurímac.

*vegas.fernando@gmail.com

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, diversas investigaciones muestran que las regiones de montaña tales como los Andes tropicales se enfrentan a diversos cambios ambientales. Estos cambios tienen un impacto directo sobre los recursos hídricos, especialmente durante la época de estiaje; es decir, tiene un efecto directo en el abastecimiento de agua para millones de personas que viven en estas regiones (Vuille et al., 2008).

Los Andes tropicales a menudo son declarados como una de las regiones del mundo más vulnerables al cambio climático (IPCC, 2007; Viviroli et al., 2007a). Las consecuencias del cambio climático en los Andes tropicales son de especial preocupación debido a la diversa naturaleza de sus ecosistemas y los efectos que los cambios en estos ecosistemas producen en una gran población que dependen directamente de los servicios que prestan (Vuille et al., 2008).

En los Andes del Sur del Perú las poblaciones están expuestas a condiciones climáticas extremas: heladas, granizo, fuertes nevadas, olas de frío, el riesgo de inundaciones y sequías. Adicionalmente, la climatología observada en los Andes tropicales durante el siglo 20 (1950–1998) muestra que las precipitaciones en el sur de los Andes peruanos presentan una tendencia general hacia condiciones más secas (Vuille et al., 2003). Estos factores pueden afectar el desarrollo sostenible de las poblaciones de los Andes del Sur del Perú y aumentar la vulnerabilidad de las poblaciones que habitan en estas regiones, que en la actualidad ya son muy vulnerables a la seguridad alimentaria donde casi el 40 por ciento de la población sufre de desnutrición (INEI, 2010).

En respuesta a la alta vulnerabilidad al cambio climático en los Andes Sur del Perú, el Ministerio del Ambiente (MINAM) de Perú en colaboración con la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE) desarrollaron el Programa de Adaptación al Cambio Climático (PACC) en las regiones de Cusco y Apurímac, que integra la gestión del agua, prevención de desastres y la seguridad alimentaria.

Para una adecuada gestión integral de los recursos hídricos es necesario conocer la variación espacial y temporal de los cursos de agua y los caudales necesarios para la conservación de los ecosistemas fluviales, y analizar los posibles efectos del cambio climático; con el fin de apoyar en las decisiones de planificación y gestión. Sin embargo, las mayores limitaciones en la investigación de los recursos hídricos de montaña es la complejidad del sistema, la falta de datos climáticos así como de observaciones in situ. En los Andes del Sur del Perú, al igual que en la mayoría de las regiones de montaña en los países en desarrollo, la información disponible acerca de sus recursos hídricos es muy limitada y tienen una base de datos muy escasa (Salzmann et al., 2009).

Debido a la falta de información disponible acerca de los recursos hídricos es necesario recurrir a herramientas numéricas, como lo son los modelos hidrológicos. Actualmente, la disponibilidad de datos espaciales tales como los modelos digitales de elevación (DEMs), las imágenes de teledetección y los datos provenientes de modelos climáticos globales (GCM) han aumentado enormemente el potencial del uso de modelos hidrológicos para evaluar los recursos hídricos. (Carpenter & Georgakakos, 2006.)

La presente investigación se realizó en el marco Programa de Adaptación al Cambio Climático (PACC) que busca enfrentar de manera planificada los efectos del cambio climático en las regiones de Cusco y Apurímac. Sin embargo, las investigaciones sobre la disponibilidad de recursos hídricos en estas cuencas son muy escasas y en lo concerniente a regímenes diarios es inexistente. Esta condición hace necesario conocer el régimen natural (condición de referencia) y a partir de este conocimiento evaluar los posibles efectos del cambio climático.

En consecuencia, el presente trabajo tiene como objetivo principal estimar los regímenes diarios en 6 cuencas hidrográficas de las regiones de Cusco y Apurímac para el periodo de estudio enero de 1993 hasta diciembre de 2009, a partir de un modelo hidrológico semidistribuido, y caracterizar los regímenes naturales de caudales en las cuencas de estudio.

Para ello, se han simulado los caudales medios diarios de las cuencas: Vilcanota (Cusco); Alto Apurímac, Oropesa, Pachachaca, Santo Tomás y Velille (Apurímac) usando el modelo hidrológico

distribuido Precipitation–Runoff–EVApotranspiration Hydrotope model (PREVAH); se ha evaluado el rendimiento del modelo hidrológico distribuido PREVAH para el periodo de estudio (1993–2009) y adicionalmente, la performance del modelo durante los dos primeros meses del año 2010 para observar su performance durante las inundaciones del 26/01/2010. Finalmente se ha caracterizado la magnitud, frecuencia, duración, estacionalidad y variabilidad de los caudales obtenidos en el periodo de estudio mediante una serie de índices hidrológicos (IH).

METODOLOGÍA

Área de estudio

El área de nuestra investigación se encuentra ubicada en los Andes Sur del Perú dentro de los departamentos de Apurímac y Cusco. La superficie de estudio comprende poco más de $24\,496\text{ km}^2$, en 6 cuencas de montaña: la cuenca Vilcanota y las cuencas Alto Apurímac, Oropesa, Pachachaca, Santo Tomás y Velille, pertenecientes a las regiones de Cusco y Apurímac, respectivamente (Ver Figura 1). Estas cuencas se encuentran dentro del sistema hidrográfico de dos grandes cuencas: la cuenca del río Vilcanota y la cuenca del río Apurímac, que forman parte a su vez del sistema fluvial del Amazonas. La ubicación y delimitación de las cuencas seleccionadas así como sus principales características se muestran en la Figura 1 y Tabla 1.

Tabla 1. Principales características de las cuencas seleccionadas en este estudio

Cuenca	Región	Area <i>km</i> ²	Altitud máxima m s.n.m.	Altitud mínima m s.n.m.	Altitud media m s.n.m.	Pendiente %
Vilcanota Km-105	Cusco	9160	6289	2156	4197	28.2
Alto Apurímac	Apurímac	9880	5421	2587	4253	6.5
Oropesa	Apurímac	3852	5320	2190	4163	12.3
Pachachaca	Apurímac	8031	5154	2370	4250	12.7
Santo Tomás	Apurímac	4556	5300	2376	4150	9.8
Velille	Apurímac	3680	5325	2662	4281	7.9

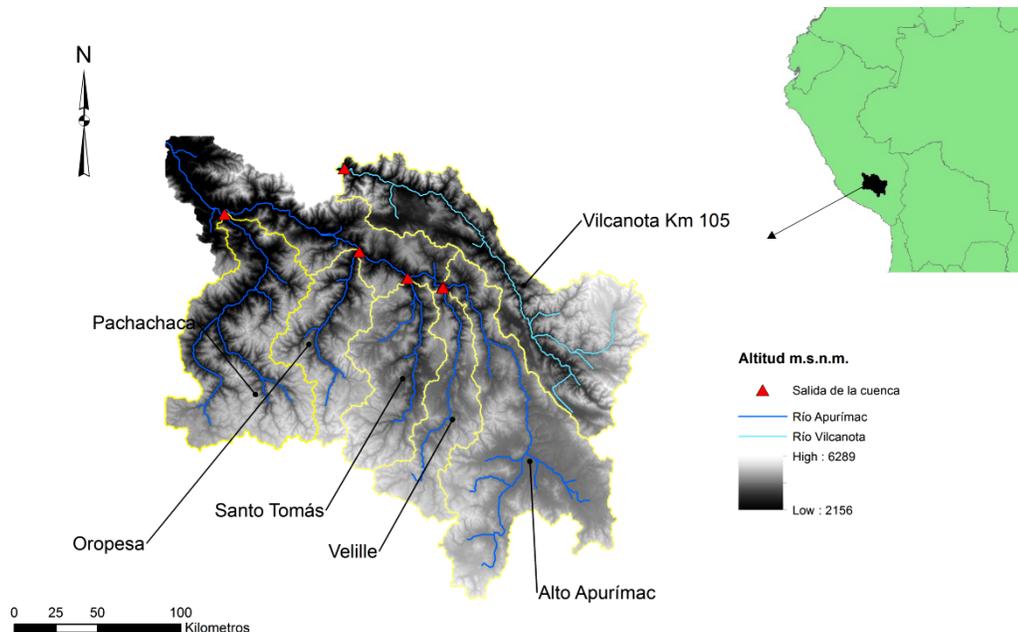


Fig. 1. Localización del área de estudio y delimitación de las seis cuencas seleccionadas (línea amarilla). La cuenca Vilcanota Km-105 pertenece al sistema hidrográfico del río Vilcanota. Las cuencas Alto Apurímac, Velille, Santo Tomás, Oropesa y Pachachaca pertenecen al sistema hidrográfico del río Apurímac

La zona de estudio se caracteriza por la presencia de pequeños glaciares, terrenos accidentados y gran altitud con un rango de elevación entre 2156 y 6289 m s.n.m. Asimismo, le caracterizan ecosistemas como páramos y punas (Sánchez-Vega & Dillon, 2006), que tienen un rol importante en la dinámica de los sistemas hídricos de montaña. Los tipos de suelos predominantes en el área de estudio son principalmente los Litosoles y Kastanozems (FAO-UNESCO, 1988b).

La cobertura y uso del suelo están relacionados directamente con la altitud, el clima y el tipo de suelo. La cobertura del suelo se encuentra dominada por pastos naturales (88.7%), matorrales (7.3%), sabana arbustiva (1.6%), pequeños glaciares y lagunas (0.4%), dispersas aéreas de cultivos tradicionales (0.7%) que se desarrollan predominantemente en los valles interandinos.

El clima de esta región se caracteriza por el típico clima andino de alta montaña donde la temperatura y la cobertura de nieve presentan muy poca variación a lo largo del año. La temperatura media anual en toda el área de estudio es de 10.5 °C; sin embargo, la variación diaria de la temperatura es considerable pudiendo alcanzar variaciones de 10 °C y estas diferencias aumentan con la altitud. La mayor cantidad de precipitaciones se presenta durante los meses de diciembre a abril, y la época seca es entre los meses de mayo a noviembre. La precipitación media anual, para el periodo comprendido 1983–2009, es de 856 mm/año y 714 mm/año para las aéreas de estudio en la región de Apurímac y Cusco, respectivamente.

Datos disponibles

Información meteorológica

Dentro del marco del PACC se ha creado un portal de datos dedicado donde se encuentra disponible los datos históricos y operacionales de más de 100 estaciones, en las regiones de Apurímac y Cusco, de la Red meteorológica del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Una descripción detallada del portal de datos y del procedimiento para homogeneizar los datos se encuentra en Schwarb et al. (2011). A partir de este se han seleccionado 36 estaciones, pertenecientes al área de estudio, que contienen datos homogeneizados de temperatura, precipitación y humedad relativa para el periodo de 1960–2010.

ERA-Interim

ERA-Interim es el reanálisis global de las condiciones de la atmósfera global y de superficie que abarca un periodo de datos desde 1979 hasta el presente (Berrisford et al., 2009) del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Corto Plazo (ECMWF), cuya base de datos se encuentra disponible en www.ecmwf.int. Esta base de datos es un registro multivariado, espacialmente distribuido y coherente de la circulación atmosférica global. Los productos incluyen una gran variedad de parámetros de superficie de 3 horas de resolución temporal y parámetros en altitud de 6 horas de resolución temporal (Dee et al., 2011). Para el presente estudio se han obtenido del ECMWF información espacial de velocidad de viento e insolación. La ubicación de las 36 estaciones seleccionadas del SENAMHI, así como de las estaciones virtuales (grid point) de los datos tomados de ERA-Interim se muestra en la Figura 2.

Información fisiográfica

El modelo digital de elevación (DEM) se obtuvo de la Misión Topográfica Radar Shuttle de la NASA (SRTM), con una resolución espacial de 3 arcos segundos (aproximadamente 90 metros) en el ecuador. Los datos SRTM se encuentran disponibles en la página web del USGS EROS Data Center (EDC) <http://srtm.usgs.gov>. La información del suelo (tipo de suelo, profundidad de suelo y humedad disponible del suelo) se ha extraído del Mapa Mundial de Suelos de la FAO (FAO-UNESCO, 1988a; Menzel, 1996); la información de cobertura y usos del suelo, de MODIS Land Cover (MOD12Q1) de 500 metros de resolución (Friedl et al., 2002).

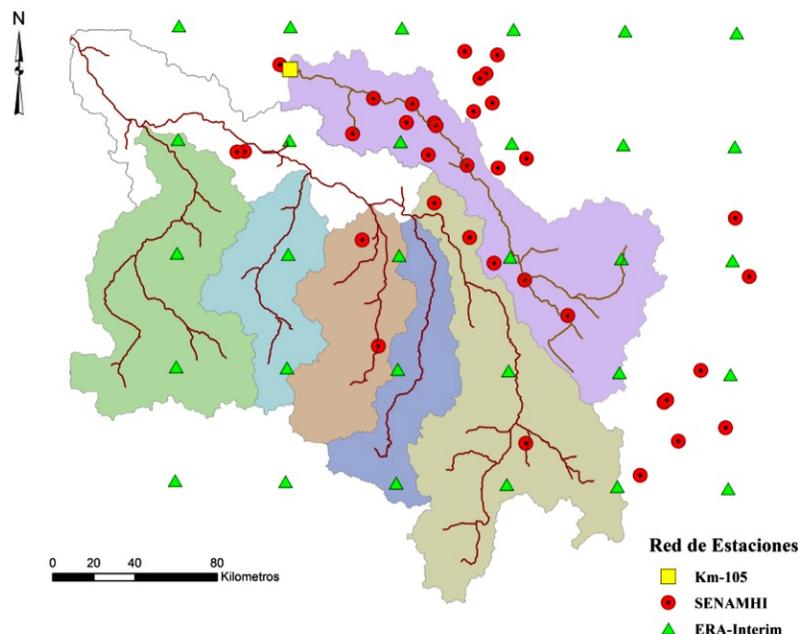


Fig. 2. Red de estaciones de las dos bases de datos climáticos usadas en el presente estudio (SENAMHI y ERA-Interim) y la estación hidrológica Km-105

Datos de aforos

En el río Vilcanota se encuentran dos estaciones de aforos: (1) estación de Pisac (SENAMHI) y (2) estación Km-105 perteneciente a una compañía hidroeléctrica (EGEMSA), ambas con datos históricos de descarga media diaria disponibles para el periodo de 1980 a 2010. A partir del análisis preliminar se excluyó la serie de datos de la estación Pisac, debido a la baja confiabilidad de sus datos que en parte se debe a su emplazamiento en una sección inestable del río, donde presenta erosión y depósitos de sedimentos. Por lo tanto, los datos de la estación Km-105 presentan una serie de datos más confiable; esta estación se ubica en una sección estable revestida de hormigón y con un mantenimiento continuo. Las características principales de la serie de caudales medidos en la estación Km-105 se muestran en la Tabla 2.

En la red hidrográfica del río Ucayali (región de Apurímac) no se encuentra ninguna estación de aforo disponible, sin embargo existen datos de descargas puntuales (tomadas durante las campañas de aforo llevadas a cabo en 2010) y de caudales medios mensuales para el periodo 1970 a 2009, disponibles en el estudio: "Caracterización de la oferta hídrica superficial cuencas Pampas, Apurímac y Urubamba"; publicado por el Ministerio del Ambiente de Perú y el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (2010). Un resumen de las características principales de las descargas medias mensuales se encuentra en la Tabla 3.

Tabla 2. Principales características de la serie de descargas diarias (1980–2010) del río Vilcanota medidas en la estación Km-105

Características	Unidad	Valor
Área de drenaje	km^2	9160
Descarga media anual	m^3/s	127
Descarga máxima diaria	m^3/s	1134
Descarga mínima diaria	m^3/s	28
Descarga media año húmedo (P_{75})	m^3/s	181
Descarga media año seco (P_{25})	m^3/s	40

Tabla 3. Principales características de las descargas medias mensuales 1970–2009 publicadas por el Ministerio del Ambiente (2010) para las cuencas de la región de Apurímac

Cuenca	Descarga	Descarga media	Descarga media
	media mensual	mensual año seco	mensual año húmedo
	m^3/s	m^3/s	m^3/s
Alto Apurímac	151.3	114.7	160.3
Oropesa	56.4	43.2	78.2
Pachachaca	91.7	71.6	127.1
Velille	58.3	42.7	59.7
Santo Tomás	77.4	56.8	110.7

El modelo hidrológico PREVAH

El modelo hidrológico distribuido PREVAH (Precipitation–Runoff–EVApotranspiration Hydrotope, Viviroli et al., 2009a) fue seleccionado debido a su versatilidad y adaptación para el modelado hidrológico en zonas de montaña en condiciones ambientales y climáticas muy variables. El modelo PREVAH fue desarrollado por el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y el Clima ETH Zürich (IACETH), el Instituto Federal Suizo para la Investigación de Bosques, Nieve y Paisajes (WSL), y el Instituto de Geografía de la Universidad de Bern (GIUB).

PREVAH se utiliza en diversas aplicaciones para la investigación de los recursos hídricos en cuencas de montaña (Kobierska et al., 2013; Zappa & Kan, 2007a), en cuencas poco instrumentadas como en China (Bosshard & Zappa, 2008) y Rusia (Oltchev et al., 2002), así mismo como fuente de indicadores hidrológicos para estimar los impactos del cambio climático sobre la distribución de la vegetación (Randin et al., 2009). En la actualidad PREVAH es utilizado en aplicaciones hidrológicas operativas y de pronósticos de eventos de inundación en Suiza (Zappa et al., 2011). Los principales componentes del modelo o submodelo son los siguientes:

- La interpolación temporal y espacial de los datos meteorológicos de entrada;
- Corrección del error de medición de la precipitación de lluvia y la nieve (Sevruk, 1986);
- Ajuste para la temperatura y la radiación (Schulla, 1997);
- Evapotranspiración potencial y real (Monteith, 1975; Wendling, 1975);
- Fusión de nieve y glaciares (Klok et al., 2001; Zappa & Gurtz, 2003);
- Intercepción (Menzel, 1997);
- Humedad del suelo y generación de escorrentía (Gurtz et al., 2003; Zappa & Gurtz, 2003).

Una revisión de las diferentes aplicaciones de PREVAH, la descripción del modelo, la parametrización y las herramientas de pre y posproceso son descritas en Viviroli et al. (2007b)

Parametrización de PREVAH

PREVAH requiere tres tipos de parámetros de entrada. (1) Información meteorológica: precipitación, temperatura, humedad relativa, radiación global, velocidad del viento y horas de sol en una escala temporal horaria o diaria. (2) Información fisiográfica para las unidades de respuesta hidrológica (HRUs). (3) Un archivo de control con la configuración de los parámetros "modificables" que necesitan ser calibrados para ajustar el modelo a las condiciones del área de estudio (Viviroli et al., 2009a).

Para el área de estudio, la resolución espacial y temporal de 540 metros y temporal de un día se seleccionaron en base a la disponibilidad de los datos y en el rango de aplicación del modelo (Zappa & Gurtz, 2003).

Los datos meteorológicos disponibles se interpolaron en cada punto de la malla con el método de segmentación de distancia inversa ponderada (DIDW) (Schwarb et al., 2011; Viviroli et al., 2009a)

La información fisiográfica se agrupó en HRUs, que caracteriza aéreas homogéneas en términos de comportamiento hidrológico. Para definir cada HRUs se consideró la elevación, orientación de la

pendiente, cobertura y uso del suelo, pendiente, propiedades del suelo y la altitud de la línea de equilibrio (ELA). ELA se estableció en 5400 m s.n.m., basado en los estudios de Rabatel et al. (2013).

La profundidad del suelo y la capacidad de agua disponible para las plantas se determinaron a partir de las clases de suelo contenidas en el Mapa Mundial de Suelos de FAO (FAO–UNESCO, 1988b), como se describe en (Viviroli et al., 2007c; Viviroli et al., 2009a).

Con la finalidad de mejorar la resolución de las propiedades del suelo se ha calculado el índice de desagregación del suelo (Viviroli et al., 2009b), que permite desagregar espacialmente la profundidad y capacidad de campo de cada unidad de suelo. Este índice de desagregación asume que los suelos más profundos y con mayor capacidad de campo se encuentran en menores altitudes y en áreas más llanas de la cuenca. El índice de desagregación se define como:

$$SOIL_{(x,j)} = \frac{DHM(x,j)}{10} + SLP(x,j).5 \quad (1)$$

Donde SOIL es el índice de desagregación calculado, DHM es la elevación y SLP es la pendiente en cada celda. La información del uso y cobertura del suelo se determinaron los valores de parámetros adicionales necesarios para estimar la evapotranspiración. La estimación de algunos parámetros del modelo, tales como el índice de área foliar y la capacidad de intercepción de almacenamiento se encuentra predefinidos en el modelo; y se basa en las investigaciones realizadas por Menzel (1997). Los estudios de Menzel son ampliados y estudiados para diferentes tipos de vegetación por Vegas et al. (2012).

Los parámetros "modificables" son una serie de parámetros para controlar cada submodelo, los cuales deben ser calibrados para el área de estudio. El rango de valores de estos parámetros y una descripción detallada se encuentra en Viviroli et al. (2009b).

La calibración y validación del modelo se ha realizado mediante un procedimiento estándar donde el conjunto de datos disponibles se dividen en dos periodos que no se superponen. Este conjunto de datos se usó para la calibración automática con PREVAH donde el objetivo fue maximizar el ajuste entre los datos de descargas observados y modelados, mediante el ajuste de los parámetros "modificables". La calibración automática PREVAH es una calibración multiobjetivo basada en un sencillo algoritmo interactivo de búsqueda global (Viviroli et al., 2009c).

Criterios de performance del modelo

Para la evaluación de la performance de un modelo es recomendable usar criterios de eficiencia complementándose con la evaluación del error de volumen absoluto o relativo (Krause et al., 2005). Es por ello que para evaluar la performance del modelo se ha seleccionado tres criterios de evaluación: el error volumétrico en porcentaje (VOL, Ec. 2), el coeficiente de eficiencia Nash–Sutcliffe (NS, Ec. 3) y el coeficiente de eficiencia de Nash–Sutcliffe, calculado con los valores logarítmicos de las descargas observadas y simuladas (NSL, Ec. 4) (Zappa & Kan, 2007b).

El VOL mide el error total de la descarga simulada. El VOL presenta tanto valores positivos como negativos: los valores positivos indican una subestimación de la descarga total simulada; valores negativos indican una sobrestimación del volumen total simulado, y un valor de cero indica un ajuste perfecto. El NS compara la predicción del modelo con las descargas diarias observadas. Para reducir el problema de sensibilidad a los valores extremos que presenta el NS se calcula el NSL con los valores logarítmicos de los valores observados y simulados. A través de la transformación logarítmica los valores picos son aplanados y los valores más bajos se mantienen más o menos al mismo nivel teniendo como resultado un incremento en la sensibilidad del NSL sobre la sobreestimación o subestimación sistemática del modelo. El rango de valores de NS y NSL se encuentra entre 1 (ajuste perfecto) y $-\infty$. Un coeficiente de eficiencia menor de cero indica que el valor medio de la serie observada podría ser un mejor pronosticador que el modelo.

$$VOL = \left(\frac{\sum_{i=1}^N Q_{sim}}{\sum_{i=1}^N Q_{obs}} - 1 \right) * 100 \quad (2)$$

$$NS = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - Q_{sim})}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \right) \quad (3)$$

$$NSL = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^N (\ln Q_{obs} - \ln Q_{sim})}{\sum_{i=1}^N (\ln Q_{obs} - \ln \overline{Q_{obs}})^2} \right) \quad (4)$$

Donde Q_{obs} es la descarga observada; Q_{sim} es la descarga simulada; $\overline{Q_{obs}}$ es la descarga media observada, y N es el número de datos.

Caracterización de caudales: Índices hidrológicos (IH)

Las series de descargas se han caracterizado en base a una serie de índices hidrológicos (IH) y agrupadas en 4 categorías: magnitud, frecuencia, duración y estacionalidad de eventos. Los índices seleccionados caracterizan estadísticamente la variabilidad interanual e intranual de las descargas. Los IH se evaluaron para las condiciones medias (valores medios) y para las condiciones más críticas (valores extremos: sequías y avenidas). La caracterización de los valores medios se realizó en 3 marcos temporales: anuales, mensuales y diarios.

Adicionalmente, para la caracterización del régimen en sus valores medios se estableció umbrales para los años secos, años húmedos y años normales; con la finalidad de caracterizar el régimen de descarga en lo que respecta a su variabilidad interanual (Richter et al., 1997). Los umbrales para los años secos y húmedos se definen como los percentiles 25 y 75 del registro continuo de descargas respectivamente. El año normal se definió como las descargas comprendidas entre los percentiles 25 y 75.

La Tabla 4 contiene el total de parámetros seleccionados y su descripción. Los 19 IH seleccionados para la representación detallada del régimen hidrológico son descritos por Richter et al. (1996), estos IH se entienden como los atributos hidrológicos ecológicamente relevantes que pueden ser utilizados para caracterizar la variabilidad de descargas. La selección de los parámetros más adecuados para la caracterización de regímenes naturales se basa en las sugerencias de Poff et al. (1997), Olden & Poff (2003) y Martínez & Fernandez (2006). Todos los parámetros de disponibilidad hídrica fueron calculados a partir de las series de descargas diarias usando la serie de códigos escritos en MatLab programming language (escrito por los autores).

RESULTADOS

Aplicación de PREVAH y performance

Debido a la baja disponibilidad de datos hidrológicos el proceso de calibración se realizó solo para la cuenca de Vilcanota y con la serie de datos de la estación hidrológica Km-105. En la fase inicial se ha considerado un periodo de 10 años (1999–2009) para calibrar el modelo. Este periodo se dividió en dos partes iguales: Los años 1999–2004 se definió como el periodo de calibración de PREVAH y el lustro 2005–2009 se definió como el periodo de validación del modelo. En todos los procesos de calibración el

Tabla 4. Parámetros de disponibilidad hídrica seleccionados y sus características

GRUPO		Característica	Índice
Valores Medios	Descargas anuales y mensuales	Magnitud	Media de las aportaciones anuales
		Variabilidad	Diferencia entre aportación máxima y mínima del año
	Estacionalidad	Mes de máxima y mínima aportación del año	
	Descargas diarias	Variabilidad	Descargas medias diarias correspondientes a los percentiles 90 y 10 (Q_{90} y Q_{10})
Valores Extremos	Descargas máximas (Avenidas)	Magnitud y frecuencia	Media de los máximos caudales diarios anuales (Q_{av}) Descarga correspondiente a la avenida habitual: Percentil 95 (Q_{95}) Coeficiente de variación de la serie de máximas descargas diarias anuales ($CV Q_{av}$) Coeficiente de variación de la serie de avenidas habituales ($CV Q_{95}$)
		Variabilidad	
		Duración	Máximo número de días consecutivos con caudal medio diario mayor que Q_{95}
	Descargas mínimas (Sequías)	Magnitud y frecuencia	Media de los mínimos caudales diarios anuales (Q_s) Caudal correspondiente a la sequía habitual percentil 5 (Q_5) Coeficiente de variación de la serie de mínimos caudales diarios anuales ($CV Q_s$) Coeficiente de variación de la serie de sequías habituales ($CV Q_5$)
		Variabilidad	
		Duración	Máximo número de días consecutivos con caudal medio diario $< Q_5$

Tabla 5. Parámetros calibrados de PREVAH obtenidos como resultado del proceso de calibración automática

Parámetro	Unidad	Valor
Corrección de la precipitación	%	11.6
Corrección de la nieve	%	32.7
Umbral de temperatura lluvia–nieve	°C	0.0
Temperatura de transición lluvia–nieve	°C	0.75
Exponente de recarga de humedad del suelo	-	2.29
Umbral de humedad de saturación para la ETR	-	0.70
Umbral de escorrentía superficial	mm	12.9
Coeficiente de almacenamiento para la escorrentía superficial	h	28.8
Coeficiente de almacenamiento del flujo hipodérmico	h	99.8
Percolación profunda	$mm.h^{-1}$	0.15
Coeficiente de almacenamiento del flujo rápido	h	468.1
Almacenamiento máximo del flujo base rápido	mm	46.8
Coeficiente de retardo del flujo base	h	3318

primer año (1998 en el periodo de calibración) se usa para inicializar el modelo. Finalmente, el modelo se validó para el periodo 1993–1998, con la finalidad de constatar su validez para eventos pasados.

El proceso de calibración se ha realizado ejecutando PREVAH (1999–2004), los resultados se compararon con las descargas observadas en el mismo periodo. Para definir los valores óptimos de los parámetros "modificables" se empleó la herramienta de calibración automática de PREVAH (Viviroli et al., 2009a). Como resultado del proceso de calibración se han obtenido los parámetros "modificables" calibrados. Tabla 5.

Los parámetros calibrados se usaron para validar los datos de descarga diaria con los datos observados en la estación Vilcanota Km–105 para los periodos 1993–1998; 2005–2009, y para todo

el periodo de estudio 1993–2009. En la Figura 3 se observa el hidrograma completo de las descargas observadas y simuladas para del periodo enero 1993 a febrero 2010. Se incluyó los dos primeros meses del año 2010 para observar la performance del modelo durante las inundaciones del 26/01/2010.

La performance del modelo para cada uno de los periodos (calibración y validación) y de los criterios de performance seleccionados se observan en la Tabla 6.

Los resultados de calibración (1999–2004) muestran una muy buena performance del modelo. Para los periodos de validación la performance del modelo es bastante buena, sin embargo en el periodo 1993–1998 el modelo tiende a subestimar en casi un 15% el volumen total simulado, por otra parte para el periodo 2005–2009 el modelo tiende a sobrestimar en casi un 6% los volúmenes. En general para todo el periodo de estudio los criterios de eficiencia NS y NSL presentan valores mayores a 0.8 lo que confirma la buena performance del modelo y el déficit volumétrico muestra que el modelo subestima ligeramente las descargas simuladas alrededor de un 2%.

A pesar de la buena performance que muestra el modelo, existen algunas diferencias entre las descargas simuladas y observadas. Durante la época de estiaje el modelo tiende a subestimar las descargas diarias alrededor del 25% en promedio; durante la época de avenidas el modelo tiende mayormente a sobrestimar las descargas máximas alrededor del 20% en promedio, sin embargo en algunos casos estas descargas máximas son subestimadas.

Debido a las diferencias entre los datos simulados y los datos observados, se han analizado estadísticamente los valores máximos y los valores mínimos con la finalidad de evaluar si el modelo

Tabla 6. Performance del PREVAH para los periodos de calibración y validación del modelo. La performance del modelo ha sido analizada usando los datos diarios observados en la estación Vilcanota Km–105 para el periodo 1993–2009

Criterio	Calibración	Validación		Periodo Total
	1999–2004	1993–1998	2005–2009	1993–2009
NS	0.89	0.89	0.86	0.89
NSL	0.91	0.81	0.90	0.87
VOL (%)	32	-281	143	-106

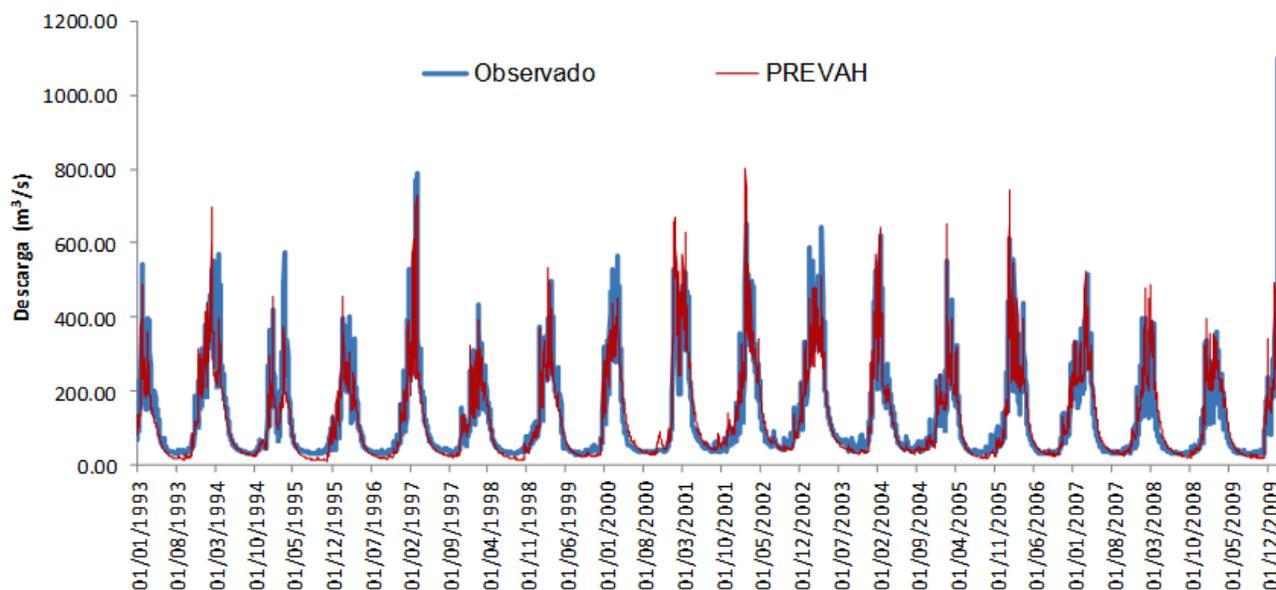


Fig. 3. Hidrograma de descargas observadas en la estación Vilcanota Km–105 (azul) y las descarga simuladas por PREVAH (rojo) para el periodo 1993–2010. Podemos observar la buena performance de los datos simulados con PREVAH

tiende a subestimarlos o sobreestimarlos. Para evaluar la tendencia y comparar los valores máximos anuales observados y simulados se ha optado por ajustar los datos a una distribución generalizada de valores extremos GEV (Coles, 2001). En la Figura 4 se muestra la distribución de probabilidad GEV para los datos observados y los simulados. Ambos conjuntos de datos muestran un buen ajuste y ambas curvas presentan una tendencia muy similar para periodos de retorno menores a 10 años. Sin embargo, cuanto mayor sean las descargas máximas observadas (periodos de retorno alto) las descargas simuladas por PREVAH tienden a sobreestimarlas.

Las diferencias entre los caudales mínimos observados y simulados se han analizado en base a la caracterización de las descargas mínimas. Para ello se estableció un umbral correspondiente al percentil 15 (P15) de la serie de datos para el periodo 1993–2010 que define las descargas mínimas. Finalmente los periodos secos se definen como la serie de datos debajo del umbral P15 y estos son caracterizados en base a su duración que es total de días donde las descargas son menores que el umbral; la severidad que es el déficit total en los días debajo del umbral y la magnitud que es la división entre la severidad y la duración (Tallaksen & Van Lanen, 2004).

La Figura 5 muestra los resultados de la comparación entre la duración, severidad y magnitud de los datos simulados y observados. La duración y severidad son subestimadas por PREVAH, sin embargo la magnitud muestra una buena correlación entre los datos observados y simulados. Asimismo, a medida que la duración se incrementa (periodos secos largos) la relación entre lo observado y simulado empeora; es decir, si los periodos secos son muy largos el modelo empeora su simulación. Esto puede deberse a diferentes factores, desde errores en la toma de datos así como la incertidumbre inherente de la modelización.

PREVAH en cuencas no aforadas

Como ya se ha descrito en secciones anteriores, en la red hidrográfica del río Apurímac no existen estaciones de aforo disponibles, pero debido a la similitud entre las regiones de Vilcanota y Apurímac se usó los mismos parámetros "modificables" calibrados en Vilcanota Km–105 para modelar las 5 cuencas ubicadas en la región de Apurímac, cuya ubicación y principales características se muestran en la Figura 1 y Tabla 1.

Sin embargo, una de las principales problemáticas de la región de Apurímac es la escasa densidad de pluviómetros en la zona (Ver Figura 2). Por esta problemática y con la finalidad de mejorar la performance del modelo para las cuencas de la región Apurímac se procedió a modificar solamente el

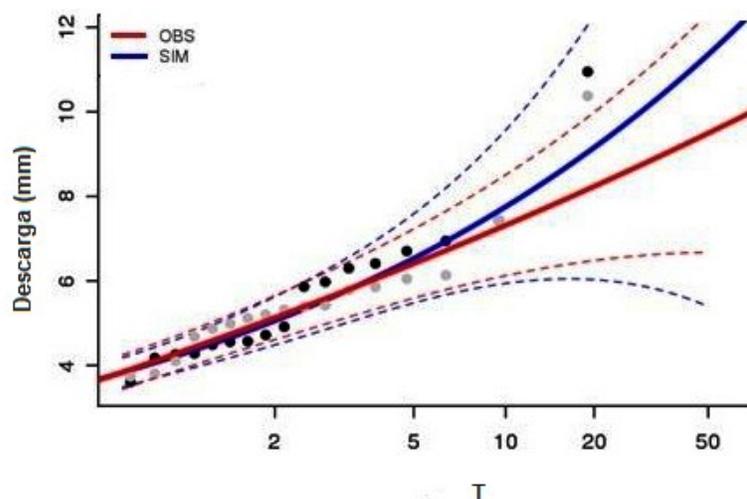


Fig. 4. Curvas de distribución generalizada de valores extremos (GEV) de descargas máximas anuales observadas y simuladas en la estación Vilcanota Km–105 para el periodo 1993–2009 (eje Y: descarga máxima en mm, eje X: periodos de retorno)

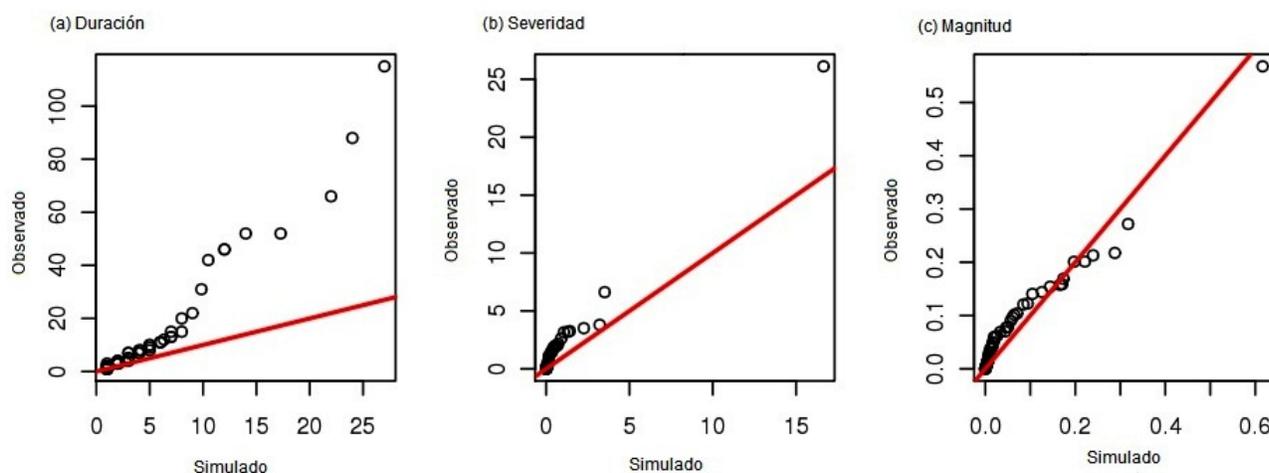


Fig. 5. (a) Duración, (b) severidad y (c) magnitud del P15 de las descargas observadas y simuladas de la estación Vilcanota Km-105 para el periodo 1993–2009. El P15 se elige como umbral para detectar las descargas mínimas. La línea roja representa un ajuste perfecto

parámetro llamado "corrección de la precipitación" del conjunto de parámetros modificables. Solo se modificó este parámetro debido a que este es el que corrige la interpolación de la precipitación (Viviroli et al., 2007b). El resto de parámetros "modificables" permanecen sin modificación, se suponen constantes en cuencas similares.

Para obtener el parámetro "corrección de la precipitación" más adecuado, el modelo PREVAH se ejecutó varias veces hasta conseguir el mejor ajuste medio mensual usando los criterios de eficiencia NS, NSL y el VOL, y se tomó como referencia los datos de descargas medias mensuales; publicadas por el Ministerio del Ambiente (Ministerio del Ambiente Perú, 2010). Los nuevos valores obtenidos del parámetro "corrección de la precipitación" para cada una de las cuencas y los criterios de eficiencia se resumen en la Tabla 7.

En la Figura 6 se observa el hidrograma medio mensual de las descargas publicadas por el Ministerio del Ambiente (2010) provenientes de un modelo mensual agregado y los resultados del modelado distribuido de PREVAH para cada una de las cuencas estudiadas de la región Apurímac. Los ajustes entre ambos resultados son bastante buenos; sin embargo, muestra algunas discrepancias entre las descargas medias mensuales más altas, en especial en la cuenca Santo Tomás (Figura 6e) presenta los mayores caudales. En el caso de la cuenca Pachachaca donde los caudales medios mensuales son menores (Figura 6c) el ajuste de descargas máximas es mejor. Adicionalmente el error volumétrico (VOL) indica que existe una incertidumbre de los volúmenes modelados por PREVAH con respecto a los publicados por el Ministerio del Ambiente (2010), que varía alrededor de -9% y 18%.

Tabla 7. Parámetro de ajuste de la precipitación usado en PREVAH para cada una de las cuencas de la región Apurímac y performance de PREVAH según los criterios de eficiencia NS, NSL y VOL. La performance del modelo ha sido analizada a nivel mensual usando los datos medios mensuales publicados por el Ministerio del Ambiente (2010)

Cuenca	Corrección de la Precipitación (%)	NS	NSL	VOL (%)
Alto Apurímac	9.0	0.95	0.92	7.7
Oropesa	15.0	0.88	0.90	18.1
Pachachaca	11.6	0.98	0.94	-6.9
Velille	13.6	0.94	0.94	8.9
Santo Tomás	13.0	0.89	0.91	19.2

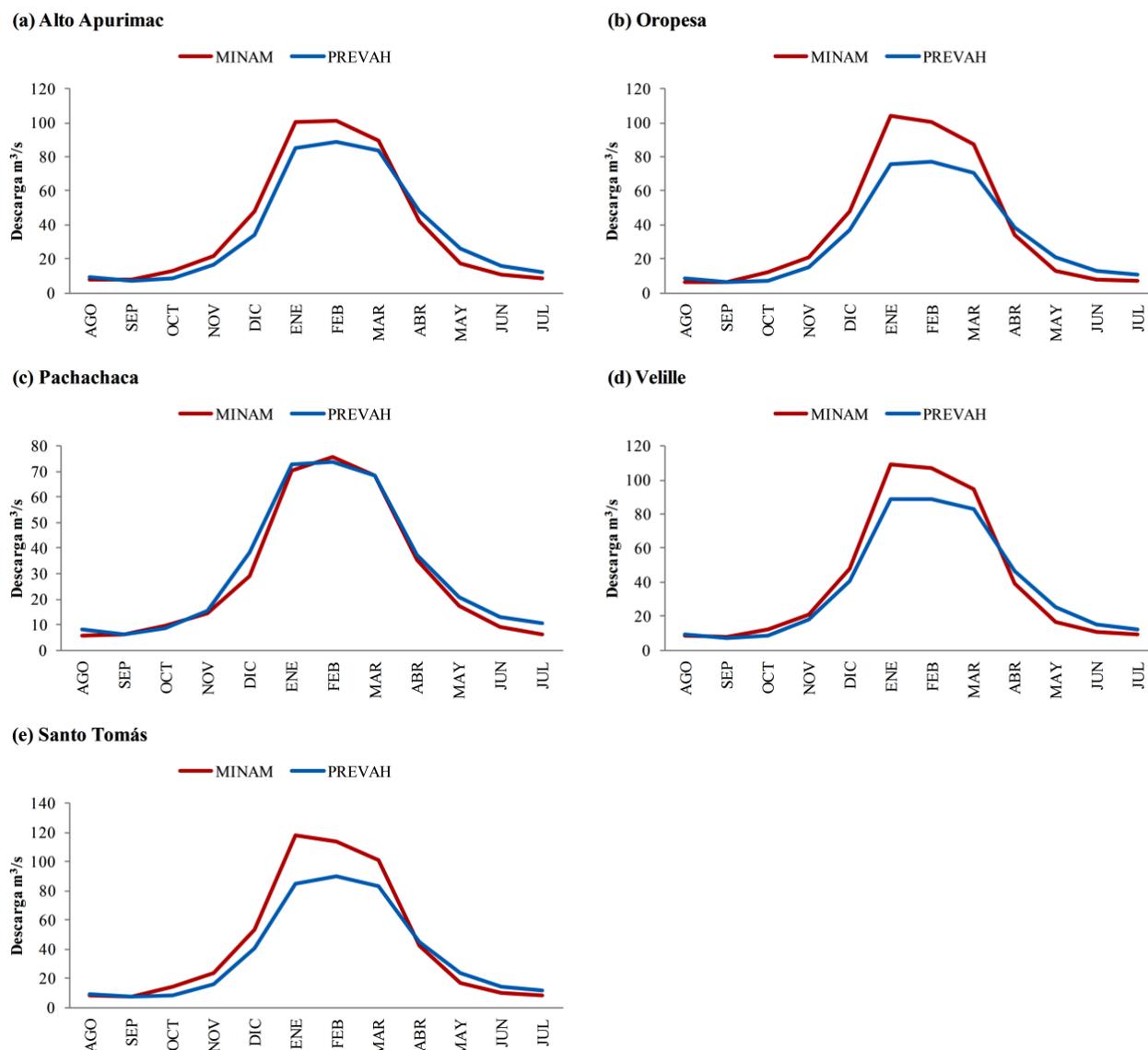


Fig. 6. Descargas medias mensuales de las cuencas (a) Alto Apurímac, (b) Oropesa, (c) Pachachaca, (d) Velille y (e) Santo Tomás. En línea rojo valores de descargas publicadas por el Ministerio del Ambiente (MINAM) y en línea azul los valores estimados con PREVAH

Caracterización del régimen natural de descargas

Las descargas medias diarias simuladas por PREVAH para el periodo 1993–2009, en las cuencas de la región Apurímac y para la cuenca del río Vilcanota, se han caracterizado por medio de los índices hidrológicos (IH). En la Tabla 8 se muestra el resultado de los 21 IH seleccionados para caracterizar la magnitud, estacionalidad y severidad de los caudales medios y extremos (avenidas y sequías) en cada cuenca estudiada. En los resultados, presentados en la Tabla 8, destaca respecto a los valores habituales que las descargas en años húmedos varían en promedio para todas las cuencas alrededor de +28% con respecto a los años normales, siendo las cuencas de Santo Tomás y Velille las que presentan mayor superávit. En cuanto a las descargas en años secos el déficit promedio para todas las cuencas es -20% con respecto a los valores normales; las que presentan un mayor déficit son las cuencas de Oropesa y Pachachaca con un 25% de déficit. Igualmente las descargas medias indican que Alto Apurímac es la cuenca con mayor producción con alrededor de $174.2 \text{ m}^3/\text{s}$ y la cuenca Pachachaca de menor producción

RÉGIMEN NATURAL DE DESCARGAS EN LOS ANDES DEL SUR DEL PERÚ

Tabla 8. Parámetros de disponibilidad hídrica para las cuencas de estudio estimados para el periodo 1993–2009

Grupo	Índice Hidrológico		Vilcanota	Alto Apurímac	Oropesa	Pachachaca	Velille	Santo Tomás
VALORES MEDIOS	Descarga	Año Húmedo	154.4	174.2	54.7	54.7	64.2	80.7
	Media Anual	Año Normal	122.2	138.6	42.8	42.8	49.8	61.3
	(m^3/s)	Año Seco	99.4	115.8	31.9	31.9	43.5	47.2
	Diferencia entre	Año Húmedo	30.6	41.2	13.7	13.7	14.6	19.2
	las descarga mensual	Año Normal	24.4	31.4	9.3	9.3	11	13.4
	máxima y mínima	Año Seco	18.7	23.8	7.4	7.4	8.6	10.4
	Meses de máxima	Año Húmedo	Mar,Ago	Ene,Sep	Feb,Oct	Feb,Oct	Ene,Sep	Mar,Sep
	y mínima descarga	Año Normal	Mar,Sep	Feb,Sep	Feb,Oct	Feb,Oct	Ene,Sep	Feb,Sep
		Año Seco	Mar,Sep	Mar,Sep	Feb,Oct	Feb,Oct	Mar,Sep	Mar,Sep
	Rango de variabilidad de las	Q_{90}	308.6	336.2	105.1	105.1	123.6	149.2
descargas medias diarias (m^3/s)	Q_{10}	37.3	29.1	8.1	8.1	10.6	12.5	
AVENIDAS	Media de los máximos							
	descargas diarias	Q_{av}	554.4	1151.4	301.9	301.9	404.7	521.1
	anuales (m^3/s)							
	Descarga de avenida	Q_{95}	369.9	471.3	141.1	141.1	166.6	207.1
	habitual (m^3/s)							
	CV máximos diarios	CV (Q_{av})	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
anuales (m^3/s)								
CV avenidas	CV (Q_{95})	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	
habituales (m^3/s)								
Máximo n° de días consecutivos	$Q \geq Q_{95}$	9.6	7.2	8.7	8.7	7.7	7.9	
con caudal medio diario $\geq Q_{95}$								
SEQUÍAS	Media de los mínimos	Q_s	33.4	23.8	6.7	6.7	8.5	10
	caudales diarios anuales							
	Caudal de la sequía habitual	$Q_{95\%}$	35.9	26.7	7.4	7.4	9.6	11.3
	CV mínimos diarios anuales	CV (Q_s)	0.1	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2
	CV sequías habituales	CV ($Q_{95\%}$)	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	0.2
Máximo n° de días consecutivos	$Q < Q_{95\%}$	29.88	23.5	31.5	31.5	22.3	25.6	
con caudal medio diario $\leq Q_5$								

con una descarga media de $54.7 m^3/s$. La variabilidad intranual, representada por la diferencia entre los valores de descargas máximas y mínimas mensuales de la serie, nos revela que en las cuencas estudiadas la variabilidad media es aproximadamente el 20% de la magnitud anual. La estacionalidad encontrada (meses de máxima y mínima descarga) es típica de los Andes del Sur del Perú. Se puede claramente distinguir entre un periodo de avenidas que se presenta entre los meses de enero a marzo y un periodo de estiaje (caudales mínimos) entre los meses de agosto a octubre; el resto de los meses del año se consideran de transición. A nivel diario, el rango de variabilidad de descargas en la zona de estudio refleja la rapidez con que se producen las variaciones de las magnitudes de una descarga. En todas las cuencas las descargas medias diarias varían desde unos pocos m^3/s a centenas de m^3/s ; la cuenca que presenta mayor variabilidad es Alto Apurímac, donde los valores medios diarios varían en un rango entre 30 a $336 m^3/s$. En lo referente a las descargas máximas, las mayores magnitudes se observan en las cuencas de Alto Apurímac y Vilcanota; aunque, la primera presenta un mayor promedio de descargas máximas diarias anuales ($471.3 m^3/s$). La duración media de una avenida en las cuencas estudiadas es alrededor de 8 días, aunque la cuenca de Vilcanota es la más vulnerable que puede presentar una duración cercana a los 10 días. En cuanto a las sequías las descargas mínimas se presentan en las cuencas de Oropesa y Pachachaca con $6.5 m^3/s$, igualmente estas son las cuencas más vulnerables a las sequías, cuya duración es alrededor de 32 días, y el promedio en la región es de 28 días.

CONCLUSIONES

La evaluación de la disponibilidad de los recursos hídricos en cuencas de montaña es una tarea compleja, esta se complica cuando no se cuenta con información de caudales; solo superada con el uso de modelos hidrológicos.

El modelo hidrológico PREVAH, seleccionado por ser un modelo distribuido, ha demostrado su versatilidad en cuencas de montaña. PREVAH fue utilizado para la simulación continua a escala diaria del comportamiento hidrológico de las 5 cuencas ubicadas en la región de Cusco y Apurímac (Sur de los Andes Peruanos). La selección del período de simulación (1993-2009) para la modelización hidrológica estuvo condicionada por la extensión y la calidad de los datos pluviométricos disponibles.

La mayor parte de la parametrización inicial de todas las cuencas se obtuvo a partir de datos físicos como el DEM, tipo de suelos, usos del suelo y cobertura vegetal y otros estimados a partir de publicaciones científicas y valores que son sugeridos en el modelo, los cuales deben ser calibrados.

La calibración y validación del modelo solo ha sido posible en la cuenca de Vilcanota debido a que es la única que cuenta con dos estaciones de caudales, una de las cuales fue rechazada debido a la incertidumbre de los datos.

El análisis de la performance del modelo se llevó a cabo cualitativamente, a través de comparaciones entre los hidrogramas simulados y observados, y cuantitativamente en base al cálculo de los coeficientes de Nash–Sutcliffe, Nash–Sutcliffe con valores logarítmicos y el porcentaje del déficit de volumen.

En general, se observa una buena performance del modelo a escala diaria, sin embargo presenta algunas inconsistencias especialmente en los valores máximos y mínimos. Para evaluar estas inconsistencias en el modelo se analizó la tendencia de las descargas máximas por medio de una distribución de valores extremos generalizada; las descargas mínimas por medio de un análisis de magnitud, severidad y duración.

El análisis de máximos y mínimos muestra una tendencia del modelo a sobreestimar los valores máximos y esta tendencia tiende a incrementarse cuando las descargas son mayores. Los valores mínimos presentan una buena relación en cuanto a magnitud; en cambio, una mala relación en cuanto a severidad y duración, y esta relación empeora cuando la duración se incrementa, es decir se presentan más días secos. Estos errores del modelo pueden originarse principalmente por las incertidumbres de la calidad de los datos, especialmente en los extremos cuya medición siempre es más imprecisa y por las dudas propias del proceso de modelización.

Debido a la falta de datos observados y a la homogeneidad de las cuencas de la región Cusco y Apurímac se usó los parámetros calibrados para la cuenca Vilcanota en las 5 cuencas de la región Apurímac, optando por un procedimiento de calibración diferente basado simplemente en corregir la interpolación de la precipitación. En general, los criterios de eficiencia señalan un ajuste bueno, sin embargo el modelo PREVAH tiende a subestimar las descargas medias en relación a los datos publicados, lo cual puede atribuirse tanto a las incertidumbres de PREVAH como a los datos provenientes de los datos publicados (modelo agregado mensual), así como a la limitada y dispersa información pluviométrica de la zona.

Los modelos hidrológicos desarrollados para las 6 cuencas incluidas en el área de estudio han proporcionado series cronológicas de descargas medias diarias, intercepción, evaporación real, humedad del suelo, flujo base, entre otros procesos hidrológicos, modelados para el período comprendido entre el 1 enero de 1993 al 31 de diciembre de 2009. Además, al ser un modelo distribuido puede obtenerse los resultados de los procesos hidrológicos en cada celda de la cuadrícula base del modelo, lo cual lo constituye en una herramienta muy poderosa para la evaluación de los recursos hídricos.

El conjunto de resultados obtenidos con el modelo, que no pueden ser presentados en detalle debido a su gran extensión, ha sido usado para caracterizar el régimen natural de las descargas en cada una de las cuencas estudiadas. Para ello se han calculado una serie índices hidrológicos que caracterizan

la magnitud, estacionalidad y variabilidad de las descargas anuales, mensuales y diarias así como las avenidas y sequías.

En base a estos índices se cuantifican la disponibilidad hídrica y la variación intra e interanual del régimen hidrológico, así como definir las avenidas o sequías más duraderas. Esta caracterización sienta la línea base del conocimiento de los regímenes de descargas naturales y posibilita evaluar, a partir de ellos, la distorsión del régimen ya sea por el cambio climático o por acción directa del hombre.

En conclusión, el uso de modelos hidrológicos semidistribuidos como lo es PREVAH son capaces de proporcionar una representación fiable del comportamiento hidrológico en cuencas de montaña, por lo tanto son una herramienta muy poderosa para evaluar las condiciones pasadas y actuales de los recursos hídricos, así como los posibles cambios en el comportamiento hidrológico en las zonas de montaña como los Andes del sur del Perú.

Asimismo, la caracterización de descargas diarias por medio de índices hidrológicos (IH) permite de una manera simplificada obtener todas las características de las descargas, y de esta manera obtener la línea base que posibilita evaluar cualquier distorsión del régimen natural y por consiguiente su hábitat físico, diversidad biológica y sus procesos ecológicos (Fernández et al., 2012).

AGRADECIMIENTO

A la Agencia Suiza para la cooperación y el desarrollo (SDC), al Ministerio del Ambiente de Perú por permitir el desarrollo de este estudio en el marco del Programa de Adaptación al Cambio Climático (PACC) en Perú. Igualmente agradecemos a SENAMHI por poner a nuestra disposición su base de datos

BIBLIOGRAFÍA

- Berrisford, P. et al., (2009). The ERA-Interim Archive. ERA Report Series, No. 1, ECMWF: Reading, UK.
- Bosshard, T., Zappa, M., (2008). Regional parameter allocation and predictive uncertainty estimation of a rainfall-runoff model in the poorly gauged Three Gorges Area (PR China). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 33(17-18): 1095-1104.
- Carpenter, T.M., Georgakakos, K.P., (2006). Intercomparison of lumped versus distributed hydrologic model ensemble simulations on operational forecast scales. *Journal of Hydrology*, 329(1-2): 174-185.
- Coles, S., (2001). *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer series in statistics, London.
- Dee, D.P. et al., (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137: 553-597.
- FAO-UNESCO, (1988a). *Soil Map of the World*, FAO, Rome, Italy.
- FAO-UNESCO, (1988b). *Soil Map Of World, Revised Legend*. World Soil Resources Reports 60, FAO, Rome, IT.
- Fernández, J.A., Martínez, C., Magdaleno, F., (2012). Application of indicators of hydrologic alterations in the designation of heavily modified water bodies in Spain. *Environmental Science & Policy*, 16(0): 31-43.
- Friedl, M.A. et al., (2002). Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2): 287-302.
- Gurtz, J. et al., (2003). A comparative study in modelling runoff and its components in two mountainous catchments. *Hydrological Processes*, 17(2): 297-311.
- IPCC, (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., Linden, P.J.v.d., Hanson, C.E. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 976.
- Klok, E.J., Jasper, K., Roelofsma, K.P., Gurtz, J., Badoux, A., (2001). Distributed hydrological modelling of a heavily glaciated Alpine river basin. *Hydrological Sciences Journal*, 46(4): 553-570.
- Kobierska, F. et al., (2013). Future runoff from a partly glacierized watershed in Central Switzerland: a 2 model approach. Submitted to *Advances in Water Resources*.

- Krause, P., Boyle, D.P., Bäse, F., (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Adv. Geosci.*, 5: 89-97.
- Martínez, C., Fernández, J.A., (2006). Régimenes de caudales: Definición del estatus hidrológico y valoración de la alteración, III Congreso de ingeniería civil, territorio y medio ambiente. Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Zaragoza, España.
- Menzel, L., (1996). Modelling canopy resistances and transpiration of grassland. *Physics and Chemistry of the Earth*, 21(3): 123-129.
- Menzel, L., (1997). Modellierung der Evapotranspiration im System Boden-Pflanze-Atmosphäre, *Zürcher Geographische Schriften* 67. ETH, Zürich, CH.
- Ministerio del Medio Ambiente Perú, (2010). Caracterización de la oferta hídrica superficial cuencas Pampas, Apurímac y Urubamba. In: Dirección General de Hidrología y Recursos Hídricos (Ed.). Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología -SENAMHI, Lima-Perú, pp. 71.
- Monteith, J. L., (1975). *Vegetation and the atmosphere*, Vol. 1: Principles London (UK): Academic Press., London.
- Olden, J. D., Poff, N.L., (2003). Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Research and applications*, 19: 101-121.
- Oltchev, A. et al., (2002). The response of the water fluxes of the boreal forest region at the Volga's source area to climatic and land-use changes. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27: 675-690.
- Poff, N. L. et al., (1997). The Natural Flow Regime. A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*, 47(11): 769-784.
- Rabatel, A. et al., (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7(1): 81-102.
- Randin, C. F. et al., (2009). Climate change and plant distribution: local models predict high-elevation persistence. *Global Change Biology*, 15(6): 1557-1569.
- Richter, B., Baumgartner, J., Wigington, R., Braun, D., (1997). How much water does a river need? *Freshwater Biology*, 37(1): 231-249.
- Richter, B. D., Baumgartner, J.V., Powell, J., Braun, D.P., (1996). A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems Un Método para Evaluar Alteraciones Hidrológicas dentro de Ecosistemas. *Conservation Biology*, 10(4): 1163-1174.
- Salzmann, N. et al., (2009). Integrated assessment and adaptation to climate change impacts in the Peruvian Andes. *Adv. Geosci.*, 22: 35-39.
- Sánchez-Vega, I., Dillon, M.O., (2006). Jalcas. In: Moraes R., M., Øllgaard, B., Kvist, L.P., Borchsenius, F., Balslev, H. (Eds.), *Botánica Económica de los Andes Centrales*. Herbario Nacional de Bolivia, Instituto de Ecología, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia, pp. 77-90.
- Schulla, J., (1997). Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen, *Swiss Federal Institute of Technology (ETH)*, Zürich
- Schwarb, M. et al., (2011). A data portal for regional climatic trend analysis in a Peruvian High Andes region. *Adv. Sci. Res.*, 6: 219-226.
- Sevruk, B. (Ed.), (1986). Correction of precipitation measurements. *ETH/IASH/WMO Workshop on the Correction of Precipitation Measurements Zürich*, 1-3 April, 1985. Institute of Geography, ETH, Zürich.
- Tallaksen, L. M., Van Lanen, H.A.J. (Eds.), (2004). *Hydrological Drought - Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. *Developments in Water Science* 48. Elsevier Science B.V., The Netherlands, 579 pp.
- Vegas Galdos, F., Álvarez, C., García, A., Revilla, J.A., (2012). Estimated distributed rainfall interception using a simple conceptual model and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). *Journal of Hydrology*, 468-469(0): 213-228.
- Viviroli, D., Dürr, H.H., Messerli, B., Meybeck, M., Weingartner, R., (2007a). Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water Resour. Res.*, 43(7): W07447.
- Viviroli, D., Gurtz, J., Zappa, M., (2007b). The hydrological modelling system PREVAH. Model documentation and user manual. In: *Geographica Bernensia P40*, B.D.o.G., University of Berne. (Ed.).
- Viviroli, D., Gurtz, J., Zappa, M., (2007c). The hydrological modelling system PREVAH. Model documentation and user manual. *Geographica Bernensia P40*, Department of Geography, University of Berne, Berne.
- Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J., Weingartner, R., (2009a). An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. *Environ Modell Softw*, 24(10): 1209-1222.

- Viviroli, D., Zappa, M., Schwanbeck, J., Gurtz, J., Weingartner, R., (2009b). Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland - Part I: Modelling framework and calibration results. *Journal of Hydrology*, 377(1-2): 191-207.
- Viviroli, D., Zappa, M., Schwanbeck, J., Gurtz, J., Weingartner, R., (2009c). Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland - Part I: Modelling framework and calibration results. *Journal of Hydrology*, 377(1-2): 191-207.
- Vuille, M., Bradley, R.S., Werner, M., Keimig, F., (2003). 20th Century Climate Change in the Tropical Andes: Observations and Model Results. *Climatic Change*, 59(1): 75-99.
- Vuille, M. et al., (2008). Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 89(3-4): 79-96.
- Wendling, U., (1975). Zur Messung und Schätzung der potentiellen Verdunstung. *Zeitschrift für Meteorologie*, 25: 103-111.
- Zappa, M., Gurtz, J., (2003). The Spatial Resolution of Physiographic Data as Sensitive Variable for Distributed Hydrological Simulations in Prealpine and Alpine Catchment, *Water resources and environment research ICWRER 2002*, Band 28, Dresden, Germany pp. 101-105.
- Zappa, M., Jaun, S., Germann, U., Walser, A., Fundel, F., (2011). Superposition of three sources of uncertainties in operational flood forecasting chains. *Atmospheric Research*, 100(2-3): 246-262.
- Zappa, M., Kan, C., (2007a). Extreme heat and runoff extremes in the Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7(3): 375-389.
- Zappa, M., Kan, C., (2007b). Extreme heat and runoff extremes in the Swiss Alps. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 7(3): 375-389.