

## DIFERENCIAS EN LA RELACIÓN ALMACENAMIENTO-DESCARGA EN LAS VERTIENTES NORTE Y SUR DE SIERRA NEVADA

V. Piña<sup>1</sup>, M. Carpintero<sup>1</sup>, A. Millares<sup>2</sup>, C. Aguilar<sup>1</sup>, J. Herrero<sup>2</sup>, M.J. Polo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Dinámica Fluvial e Hidrología, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, Edificio Leonardo Da Vinci, Área de Ingeniería Hidráulica. 14071, Córdoba. o92pibuv@uco.es, o32cargm@uco.es, caguilar@uco.es, mjpolo@uco.es.

<sup>2</sup> Grupo de Dinámica Fluvial e Hidrología, Universidad de Granada, Centro Andaluz de Medio Ambiente, Av. del mediterráneo s/n. 18006, Granada. herrero@ugr.es, mivalag@ugr.es.

**RESUMEN.** El Espacio Natural de Sierra Nevada (ENSN) presenta unos materiales cuya naturaleza es impermeable, pero que en la práctica constituyen un depósito intermedio de agua por su carácter fracturado, caracterizando así la interacción entre aguas superficiales y aguas sub-superficiales y que permite mantener manantiales, surgencias y caudal base en los ríos durante el verano, alimentados con la dinámica de la fusión de la nieve. La interacción entre las aguas superficiales y subterráneas en Sierra Nevada es intensa, debido a las condiciones naturales del terreno, la intensa derivación por acequias de careo y regadío. El estudio de los procesos asociados a la dinámica de la nieve a lo largo de la historia, ha sido limitado debido a la complicada accesibilidad de las zonas en las que la nieve está presente. Esto limita la cuantificación de la precipitación sólida caída en forma de nieve, su posterior fusión y la cantidad de agua líquida liberada tras este fenómeno que pasa a formar parte de los diferentes flujos (caudal superficial, flujo sub-superficial y caudal base) del ciclo hidrológico. En la actualidad, el desarrollo de la teledetección, y de los sistemas de información geográfica han permitido un gran avance en la toma de datos en las zonas con presencia de nieve. De este modo, a través de modelos hidrológicos que analizan cada subsistema involucrado es posible cuantificar la nieve acumulada y separar los efectos de la fusión de nieve y el caudal base. Además es posible predecir escenarios futuros que surgen de previsiones meteorológicas realizadas. El objetivo de este trabajo consiste en estudiar el comportamiento de los diferentes eventos de precipitación y el comportamiento de los flujos superficiales y sub-superficiales de la zona de estudio a partir del modelado hidrológico con base física configurado para todo el conjunto del Parque durante el período 2007-2010. Mediante el modelo WiMMed, se ha realizado un análisis de la precipitación y la escorrentía generada que ha permitido establecer los distintos comportamientos meteorológicos e hidrogeológicos que existen entre la vertiente norte y la sur del macizo de Sierra Nevada.

**ABSTRACT.** The Sierra Nevada Natural Park (Southern Spain) presents a material whose nature is very impervious, but that in practice constitute a reservoir of water due to their fractures, characterizing the interaction between surface and subsurface waters. Its keep, springs and base flow in rivers during the summer, they are fed with the dynamics of snowmelt. The interaction between surface and groundwater in Sierra Nevada is intense, due to the natural conditions of soil, the intense derivation by irrigation

ditches. The study of the processes associated with snow throughout history, has been very limited due to the difficult accessibility of the areas where the snow appears. This limits the quantification of snowfall, melting and the quantity liquid water released, that becomes part of various flows (surface flow, sub-surface flow and base flow) on the hydrological cycle. Actually, the development of remote sensing and geographic information systems have enabled an important advance in data gathering in areas with presence of snow. So, through hydrological simulation models is possible to quantify the amount of snow accumulation and to separate the snowmelt and base flow effects. So, it is possible to predict future scenarios arising from weather forecasts. The objective of this paper is to study the behaviour of the area from physically based hydrologic modeling conducted for Sierra Nevada during the 2007-2010 period for which weather information is available enough. In this work using the hydrological model WiMMed, has made an analysis of the amount of rainfall in the mountains, differentiating between sides, allowing you to observe a precipitation event, both sides are behaving differently.

### 1.- Introducción

El efecto de la topografía, la geología y el clima, en general de los efectos del entorno hidrogeológico permiten conocer las relaciones que existen entre almacenamiento y descarga (Tallaksen, 1995). Estos efectos se evidencian en la zona estudiada, el Espacio Natural de Sierra Nevada (ENSN), donde coexisten condiciones mediterráneas y alpinas, y donde la superficie del terreno presenta un grado de fracturación que permeabiliza unos materiales en sí, de naturaleza impermeable. La dificultad para obtener datos de las aportaciones subterráneas complica enormemente su estudio, a diferencia de los procesos superficiales. En general, en las zonas de montaña y cabeceras de cuencas, debido al tipo de materiales que las conforman, generalmente muy fracturados, aumenta la dificultad para identificar los aportes subterráneos, y se alejan bastante de las consideraciones clásicas del medio poroso adoptadas en la hidrogeología convencional.

El objetivo principal de este trabajo es caracterizar y modelar las aportaciones de caudal base entre las laderas norte y sur de Sierra Nevada, a partir de una metodología que diferencie entre tipos de respuesta en entornos montañosos de materiales fracturados, y estudiar las

implicaciones hidrológicas de las principales variables meteorológicas entre las dos laderas estudiadas.

## 2.- Materiales y Métodos

El estudio de caudal base se ha llevado a cabo en dos subcuencas pertenecientes a diferente formación geológica, Monachil (vertiente norte) y Cádiar (vertiente sur) (Fig. 2), ambas influenciadas por la dinámica de la nieve, en cuyos puntos de cierre se cuenta con series de caudal medio diario ( $m^3/s$ ) medido en las estaciones de aforo pertenecientes al Distrito Hidrográfico del Guadalquivir y al Distrito Hidrográfico Mediterráneo respectivamente, de 41 y 67 años de duración (Fig. 1).

La aplicación de cualquier modelo hidrológico distribuido requiere disponer de las variables meteorológicas de una forma igualmente distribuida, espacialmente en cada tramo de estudio, y temporalmente para cada estado considerado. El modelo utilizado para evaluar la respuesta hidrológica de la zona de estudio ha sido WiMMed, un modelo hidrológico completo, distribuido y de base física, promovido por la Agencia Andaluza del Agua para caracterizar las cuencas mediterráneas, localmente calibrado y validado para diversas cuencas andaluzas (Herrero *et al.*, 2009a; Millares *et al.*, 2009; Polo *et al.*, 2009; Egüen *et al.*, 2009; Herrero *et al.*, 2009b; Aguilar *et al.*, 2010), que se compone de una serie de módulos que realizan, entre otros, la interpolación de variables meteorológicas, interceptación de la precipitación, fusión de nieve, balance de agua en el suelo, circulación superficial en ladera, acuíferos superficial y profundo, y por último circulación en cauce y embalse.

En este estudio se ha simulado el comportamiento hidrológico de ambas vertientes durante el periodo 2007-2010, prestando atención a diferentes aspectos relevantes en la hidrología local.

Todos estos procesos se desarrollan a escala espacial de tramo (celda del MDE disponible), salvo los relacionados con los acuíferos, que se agregan en tramos mayores que dependen de la configuración espacial de los propios acuíferos.

### 2.1.-Descripción de la zona de estudio

Sierra Nevada es una cadena montañosa situada en la cordillera penibética, que está delimitada por el valle de Lecrín al oeste, el valle del Guadalfeo al sur, por la depresión Bética al norte, por el corredor de Gérgal al este, y por el valle del Andarax al sureste. El Parque Nacional abarca dos vertientes, la norte o atlántica y la sur o mediterránea, separadas por la línea de crestería del macizo. La vertiente norte es más fría, por su menor insolación y mayor exposición a los vientos del norte, que la vertiente sur, lo que influye en los procesos de acumulación y fusión de nieve. El relieve es diferente para ambas vertientes, siendo abrupto para la cara norte y suave para la cara sur. La distribución de la precipitación se ve marcada por la alineación oeste-este del macizo, coincidente con la dirección de los frentes de precipitación atlánticos; debido a ello, los valles occidentales son los más húmedos y los más

secos los orientales. Su hidrología está directamente condicionada por las variables que controlan la acumulación y fusión de nieve, así como con el comportamiento hidrogeológico de los materiales aflorantes.

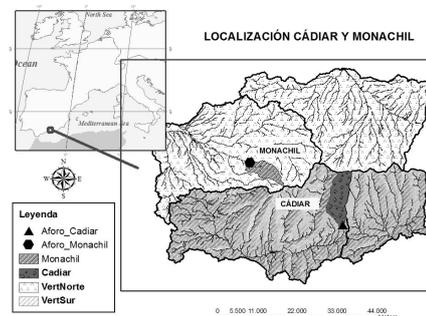


Fig.1. Localización del área de estudio.

En Sierra Nevada, desde el punto de vista geológico, se diferencian dos grandes conjuntos rocosos, a) el complejo Nevado-Filábride, típico de la alta montaña de Sierra Nevada, donde predominan los micaesquistos y las cuarcitas; y b) el complejo Alpujárride, donde aparecen filitas, cuarcitas y carbonatos (calizo-dolomías). Los primeros se presentan fuertemente fracturados y muy descompuestos en la superficie. A través de sus fracturas, debidas a las franjas de derrubios y de alteración, la presencia de agua es evidente en estos materiales, circulando entre ellos importantes volúmenes de agua (Castillo, 1993). Las cotas más bajas se ven modificadas en su mayoría por la presencia de manantiales, debidos principalmente a careos, riegos y derivaciones de acequias aguas arriba. Las acequias de careo se utilizan para aprovechar el agua estacional y evitar que se vaya de forma rápida de la cuenca, a través de la red de drenaje natural (Millares, 2008) y las de regadío transportan el agua a los cultivos (Navarro, 1983).

A diferencia de los micaesquistos, el complejo alpujárride destaca por su elevado interés hidrogeológico (Castillo *et al.*, 1996a), dado su elevado interés acuífero. Se presenta altamente fracturado y moderadamente karstificado, dotado de gran permeabilidad, consecuencia de la intensa fracturación de sus materiales.

Esto se traduce en una mayor capacidad de almacenamiento así como una mayor inercia en la relación almacenamiento-descarga, que permite reproducir el comportamiento de los acuíferos en la superficie (Millares, 2008). Ambos acuíferos, aunque de naturaleza diferenciada, presentan características similares que remarcan la peculiaridad de los mismos; flujo sub-superficial topográfico, existencia de diferentes surgencias de respuestas diferenciadas así como la ausencia de una conexión directa entre río-acuífero (Castillo, 1996; Millares *et al.*; 2009). Por otra parte, la alineación oeste-este del macizo influye de forma notable en cuanto a distribución de precipitación. La incidencia de borrascas sudatlánticas que van barriando la región de oeste a este

hace que los valles occidentales sean más húmedos que los orientales.

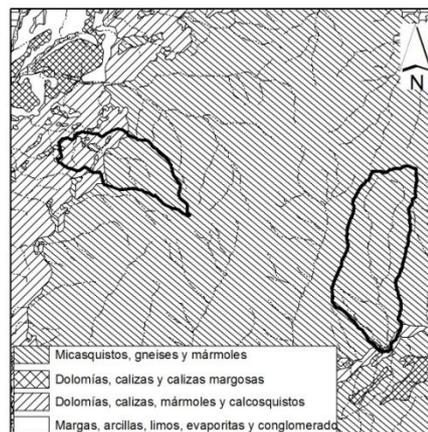
## 2.2.-Descripción básica del modelo hidrológico

El modelo WiMMed realiza un balance de agua y energía a escala de tramo (celda del MDE disponible), a escala horaria durante un evento de precipitación (o subhoraria si hay presencia de nieve), y a escala diaria en los períodos entre eventos. A partir de la distribución espacial de lluvia y restantes variables meteorológicas, se realiza el balance de agua y energía en cada celda para cada estado, calculando primero la fusión desde la capa de nieve, en su caso, y utilizando la ecuación de Van Genuchten y la ecuación de Green y Ampt para el cálculo de la dinámica de retención e infiltración de agua en el suelo. Para ello se requiere información sobre parámetros del suelo como la conductividad hidráulica, potencial matricial,  $n$  de Van Genuchten, humedad saturada y residual y espesor de las capas que se toman de cartografía disponible.

Las principales variables de entrada al modelo WiMMed son las meteorológicas, las topográficas (Modelo Digital de Elevaciones), y los datos del suelo y acuíferos, como son sus propiedades físicas e hidrológicas. Las variables meteorológicas utilizadas han sido precipitación horaria, precipitación diaria, temperatura diaria (máxima, media y mínima), velocidad del viento media diaria, radiación solar media diaria, la presión de vapor media diaria y la emisividad atmosférica media diaria. Una vez recopiladas las series temporales de las variables disponibles a distintas escalas temporales, se analiza la distribución espacial de las estaciones y la calidad de la serie temporal. Las diferencias de las variables meteorológicas de ambas vertientes de Sierra Nevada, conllevan a un estudio independiente de la vertiente norte y sur. Así, una vez delimitadas las cuencas a estudiar en cada una de las vertientes, se seleccionan las estaciones que se encuentran contenidas en cada cuenca y aquellas estaciones cercanas que puedan proporcionar información útil. Seguidamente, se realiza un análisis de calidad de los datos para detectar y eliminar estaciones que proporcionan información incoherente. Para ello, se estudia de forma conjunta la correlación de cada una de las estaciones con las demás, y la coherencia de los valores medidos en relación a las diferencias en el espacio y en cota entre estaciones. Los fuertes gradientes de altitud de la zona originan fuertes gradientes y contrastes en las variables meteorológicas que son imprescindibles captar con las estaciones disponibles para poder simular correctamente el comportamiento hidrológico de la cuenca. Las propiedades físicas e hidrológicas de los suelos se han obtenido directamente de los mapas elaborados para toda Andalucía por Rodríguez (2008; 2009).

La precipitación en la cuenca se produce principalmente como consecuencia del paso de borrascas, que se desplazan dejando cantidades variables de lluvia, normalmente a lo largo de varios días. Durante estos días la relación que existe en un instante determinado entre la posición y características de la borrasca y la orografía determina la distribución de las lluvias. Debido a la complicada orografía

que presenta el ENSN, con macizos que actúan como barreras, durante un determinado instante pueden producirse lluvias intensas y muy localizadas. Por ello, tanto a escala diaria como a horaria, la distribución de la precipitación es muy irregular y sin una correlación espacial directa con la altitud, ni entre estaciones; dicha correlación espacial aparece cuando se agrega la lluvia a escala de evento, es decir, de borrasca, factor tenido en cuenta en la interpolación espacial (Herrero *et al.*, 2007).



**Fig 2.** Configuración geológica en el ENSN, (leyenda) y delimitación de las cuencas analizadas en el estudio

Se ha prestado igual atención a la temperatura, al ser la variable con mayor influencia en la distribución de la nieve y conformar el ejemplo típico de interpolación dominado por un gradiente claro con la altitud. Para el cálculo de la radiación horaria en cada punto, WiMMed parte de medidas de radiación global diaria en ciertas estaciones.

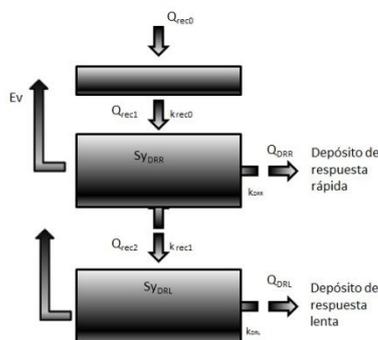
## 2.3. Análisis del caudal base

WiMMed realiza un cálculo hidrológico físico y distribuido tanto en superficie como en la zona no saturada del suelo, que está representada por un modelo de dos capas. Para el cálculo del flujo subterráneo, se incorpora un modelo agregado alimentado por la recarga distribuida procedente del suelo y subdividido en zonas acuíferas homogéneas (Millares *et al.*, 2009). Cada zona acuífera seleccionada se simula mediante tres depósitos en donde se supone la condición de linealidad del sistema (Fig. 3) que relaciona el almacenamiento con la descarga. Esta condición de linealidad viene definida por la ecuación

$$S = k * Q, \quad (1)$$

donde  $S$  es el almacenamiento,  $k$  la constante de retención (Wittenberg, 1994) y  $Q$  el caudal de salida. Según diferentes autores (Cooper y Rorabaugh, 1963; Rutledge and Mesko, 1996) esta constante puede relacionarse con diferentes parámetros hidrogeológicos como la

transmisividad de los materiales acuíferos  $T$ , el coeficiente de almacenamiento  $S$  o la permeabilidad  $K$ , aunque estas relaciones parten de la idealización de la conexión directa entre río-acuífero y han de interpretarse según las condiciones reales del acuífero estudiado.



**Fig 3.** Modelo conceptual de depósitos planteado para la simulación de zona saturada.

WiMMed alberga un primer depósito de transición, que recibe la recarga que proviene de la zona no saturada  $Q_{rec0}$  (ver Fig.3) y la transmite al primer depósito de almacenamiento subterráneo de respuesta rápida  $Q_{rec1}$  con una constante de retención  $k_{rec0}$ . Este depósito superficial de transición simula el tiempo de retardo que sufre el agua en su viaje desde la zona no saturada hacia la zona saturada. El siguiente depósito, de respuesta rápida, posee dos salidas una respuesta rápida hacia la red de drenaje  $Q_{DRR}$  y otra que recarga un segundo depósito que modela la respuesta lenta del sistema  $Q_{rec2}$ . Este depósito de respuesta rápida viene caracterizado por las constantes de retención  $k_{DRR}$  y  $k_{rec1}$ , así como por su rendimiento específico  $Sy_{DRR}$ . También posee una altura umbral  $h_{DRR}$  por debajo del cual no existe  $Q_{DRR}$ , que permite simular ese comportamiento típico en ciertos acuíferos, como puede ser el caso de aquellos en materiales carbonatados (Millares, 2008). El depósito de respuesta lenta solo realiza aportaciones hacia la red de drenaje  $Q_{DRL}$  según una constante de retención  $k_{DRL}$ , un rendimiento específico  $Sy_{DRL}$  y también con una altura umbral  $h_{DRL}$ . En WiMMed, los rendimientos específicos vienen expresados en tanto por uno (metro por metro), las constantes de retención en días y las alturas umbral en mm. El comportamiento de los acuíferos de Monachil y Cádiar, se ve influenciado por las condiciones hidrológicas de las cuencas, y sus parámetros reflejan dicho comportamiento diferenciado (Millares, 2008).

### 3.-Resultados

Para el estudio de la precipitación y la temperatura, se han simulado de forma independiente ambas vertientes de la zona de estudio, considerando los datos meteorológicos arrojados por las estaciones ubicadas en el interior de cada una de las vertientes, de forma que no influyan en los resultados los datos de estaciones situadas en la ladera contraria.

#### 3.1.-Vertiente norte

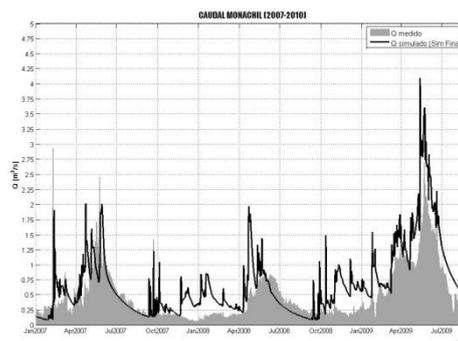
La tabla 1 representa los valores medios de los mapas distribuidos con las propiedades del suelo utilizados en la simulación definitiva de Monachil. La tabla 2, por su parte, recoge las características de los dos acuíferos en los que se ha dividido dicha subcuenca. La zona acuífera denominada 21, representa la parte más alta de Sierra Nevada, por encima de 2500 m de altitud, donde el escaso desarrollo del suelo y la presencia de materiales altamente fracturados y cuerpos detríticos de origen glaciar hacen que el conjunto se comporte como un acuífero muy permeable y de pequeñas dimensiones (Castillo y Fedeli, 2002). Es también la zona de mayor influencia de los procesos relacionados con la nieve. La zona acuífera 19 representa la zona baja, con suelos más desarrollados y menos alterada por glaciario, con descargas más lentas y, por tanto, constantes de retención mayores.

**Tabla 1.** Valores medios de los mapas de suelo utilizados en la simulación de Monachil

Propiedades del Suelo	Valor medio
Conductividad hidráulica saturada superficie	17.6 mm/h
Conductividad hidráulica saturada suelo	16.3 mm/h
Capacidad de Aporte Flujo sub-superficial	3.2 mm/h
Potencial matricial de secado	-928.8 mm
Potencial matricial de humedecimiento	-464.3 mm
n de VanGenuchten	2.6
Humedad Saturada del suelo	0.3 mm/mm
Humedad Residual del suelo	0.1 mm/mm
Espesor Capa Superficial 1 del suelo	125 mm
Espesor Capa Inferior 2 del suelo	371.9 mm

**Tabla 2.** Características de los acuíferos en Monachil

Id	$k_{rec0}$ (día)	$k_{DRR}$ (día)	$k_{rec1}$ (día)	$h_{DRR}$ (mm)	$Sy_{DRR}$ (x1)	$k_{DRL}$ (día)	$h_{DRL}$ (mm)	$Sy_{DRL}$ (x1)
19	1	7	3	0	0.5	70	0	0.8
21	1	12	5	0	0.5	60	0	0.8



**Fig 4.** Simulación Monachil para el periodo comprendido entre 2007-2010

En el proceso de calibración se han ajustado los parámetros hasta obtener una curva de caudal simulado que reproduzca de la mejor forma posible el caudal medio diario medido para el periodo comprendido entre 2007-2010, obteniéndose como resultado el mostrado en la Fig. 4.

3.2. Vertiente sur

Para la vertiente sur de Sierra Nevada, se ha seleccionado la subcuenca de Cádiar, cuyos valores medios de los mapas distribuidos con las propiedades del suelo se recogen en la tabla 3. Y en la tabla 4 quedan representadas las características de los acuíferos.

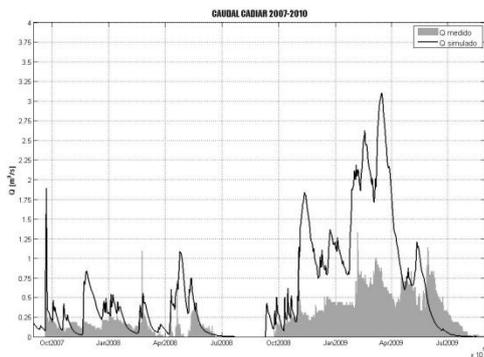
**Tabla 3.** Valores medios de los mapas de suelo utilizados en la simulación de Cádiar

Propiedades del Suelo	Valor medio
Conductividad hidráulica saturada superficie	17.1 mm/h
Conductividad hidráulica saturada suelo	8.2 mm/h
Capacidad de Aporte Flujo sub-superficial	2.6 mm/h
Potencial matricial de secado	-59.5 mm
Potencial matricial de humedecimiento	-29.7 mm
n de VanGenuchten	1.3
Humedad Saturada del suelo	0.3 mm/mm
Humedad Residual del suelo	0.1 mm/mm
Espesor Capa Superficial 1 del suelo	25 mm
Espesor Capa Inferior 2 del suelo	333.7 mm

**Tabla 4.** Características de los acuíferos en Cádiar

Id	$k_{rec0}$ (día)	$k_{DRR}$ (día)	$k_{rec1}$ (día)	$h_{DRR}$ (mm)	$S_{YDRR}$ (x1)	$k_{DRL}$ (día)	$h_{DRL}$ (mm)	$S_{YDRL}$ (x1)
1	1	11	8	0	0.5	30	0	0.8
2	1	13	7	0	0.5	20	0	0.8

De igual forma que en la vertiente norte, se ha calibrado WiMMed para simular el caudal medio diario registrado en el punto de cierre de esta subcuenca (Fig. 5).

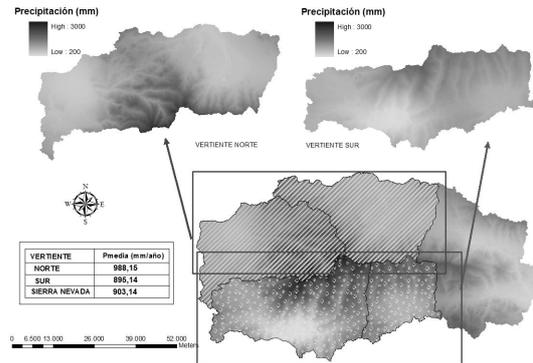


**Fig 5.** Simulación Cádiar para el periodo comprendido entre 2007-2010

Para concretar en el comportamiento de la cuenca en las diferentes laderas de Sierra Nevada, se ha llevado a cabo de forma paralela el estudio de la precipitación que cae en cada una de las laderas en toda la región de Sierra Nevada, que incluye el ENSN y un perímetro que incluye el fondo de los valles adyacentes (4580 km<sup>2</sup> en total) (Fig. 6).

En los resultados obtenidos al simular el período comprendido entre 2007-2010 para toda Sierra Nevada, se aprecia claramente el aumento de precipitación con la altitud y la menor precipitación que se recoge en las zonas de valles (manchas blancas en la figura). En el sur, la precipitación en las cumbres alcanza un máximo de 930 mm/año, mientras que en el valle de Órgiva sólo se llega a 400 mm/año. En el norte, la precipitación sobre los 2500 m de altitud toma valores de 1450 mm/año, mientras que se

destacan por su menor pluviometría la Vega de Granada con 604 mm/año y la meseta de Guadix con 560 mm/año.



**Fig 6.** Precipitación (mm/año) en ENSN para el período 2007-2010.

4.-Discusión

Observando de forma paralela los parámetros de calibración de la vertiente norte, con los de la vertiente sur, se observa que existen diferencias significativas en cuanto a vertientes. Así, se emplean valores diferentes de dichos parámetros que se justifican por la existencia de diferencias significativas en los materiales de ambas vertientes. Es de destacar la diferencia que existe entre los acuíferos, ya que, aunque los materiales son los mismos en las dos subcuencas, pertenecientes al manto alpujarride, la distinta orientación de los estratos y una fracturación diferente en los materiales provocan esta diferencia tan llamativa entre los valores efectivos finales de las constantes de retención. De igual forma, la presencia de acequias como técnica agrícola en Sierra Nevada, influye notablemente en el balance hídrico anual de cada subcuenca, desviando el caudal circulante sub y superficialmente y aumentando las salidas del sistema por evapotranspiración (Millares, 2008; Herrero *et al.*, 2010). Este aumento se produce por efecto del riego en los diferentes cultivos y en los pastos regados por las acequias, como por aquella vegetación silvestre asociada a las filtraciones que éstas producen. Estas pérdidas se han tenido en cuenta a la hora de valorar los registros de caudales medidos en las diferentes estaciones y comparar con los datos simulados con un modelo físico basado en entradas por precipitación (Millares *et al.*, 2009).

El grado de ajuste alcanzado en la simulación de caudal en la estación de Monachil es, por el contrario, bastante eficaz, a diferencia, del ajuste llevado a cabo en la estación de Cádiar, donde existen diferencias notables entre ambos caudales, simulado y observado en ciertos períodos. Esto último es debido, como ya se ha apuntado, a que la zona sur de Sierra Nevada se encuentra bastante alterada por el sistema de acequias, mientras que la zona norte se ve poco influenciada por ésta técnica agrícola.

El diferente comportamiento de ambas laderas se recoge también en la distribución de la precipitación en toda Sierra Nevada que varía para cada una de las vertientes. Así, se observa que mientras en la ladera norte cae una

precipitación media de casi 1000 mm durante los tres años simulados, la precipitación media para la vertiente sur es de aproximadamente 900 mm observando que las zonas con mayor altitud, presentan un mayor valor de precipitación, a diferencia de los valles, donde se recogen los valores más bajos para dicha variable.

## 5.-Conclusiones

Los resultados de este trabajo revelan un comportamiento hidrológico diferenciado entre las laderas norte y sur de Sierra Nevada, debido a la acción acoplada de dos factores: el diferente patrón y orden de magnitud de la precipitación en ambas vertientes, tanto en años húmedos como secos, y el diferente estado de los materiales que conforman ambas vertientes, con un estado de fracturación en la vertiente sur que genera valores efectivos más elevados de los parámetros que reproducen el comportamiento sub-superficial de los flujos de agua que los que corresponderían a la naturaleza original del material. En el proceso de calibración y validación del modelo hidrológico empleado, estas diferencias se reflejan claramente en los parámetros de recesión correspondientes al modelo de acuíferos, lo que indica un comportamiento diferenciado del flujo sub-superficial entre las laderas norte y sur de Sierra Nevada. En Monachil, la constante de retención del depósito de respuesta lenta es cuatro veces superior al utilizado en Cádiar, debido a que en el primero existen dos tipos de materiales diferentes, micaesquistos y calizo-dolomías, estos últimos altamente permeables debido a la fracturación de sus materiales, que se traduce en una mayor inercia en la relación almacenamiento-descarga. Se ha podido cuantificar con exactitud la diferencia de precipitación entre la ladera norte y sur de Sierra Nevada, siendo un 10% mayores en la vertiente norte, dentro de una precipitación media en el ENSN y su perímetro de 942 mm/año entre 2007 y 2010.

*Agradecimientos.* A la Agencia Andaluza del Agua por la financiación para el "Proyecto Guadalfeo" dentro del cual se integra el estudio desarrollado. A Egmasa, por el "Servicio para el diseño de un sistema de cobertura de nieve en Sierra Nevada", a la Dirección General de Tráfico, Ministerio del Interior, por los datos correspondientes a las estaciones meteorológicas de la A-395 y al Subsistema CLIMA de la Junta de Andalucía por la información meteorológica utilizada en este trabajo.

## 6.-Bibliografía.

Aguilar, C.,Herrero, J., Polo y M.J., 2010. Topographic effects on solar radiation distribution in mountainous watersheds and their influence on reference evapotranspiration estimates at watershed scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, pp. 2479-2494.

Castillo, A. 1993. Aguas de Sierra Nevada. *En Aguas de Sierra Nevada*. Emasagra. Ferrer, M. y Fernández Durán, E. Granada.

Castillo, A, del Valle, M., Rubio-Campos, J.C. y Fernández-Rubio, R., 1996. Síntesis Hidrológica del macizo de Sierra Nevada (Granada y Almería). *I Conf. Intem. Sierra Nevada*, pp. 389-413. Granada.

Castillo, A.y Fedeli, B. 2002. Algunas pautas del comportamiento hidrogeológico de rocas duras afectadas por glaciario y periglaciario en Sierra Nevada (España). *Geogaceta*, 32: 189-191.

Cooper, H.H. y Rorabaugh M.I., 1963. *Groundwater movements and bank storage due to flood stages in surface streams*. USGS Water Supply

Paper. 1536, 343-366.

Egüen, M., Aguilar, C., Polo, M.J., Moreno, I., Herrero, J., Millares, A. y Losada, M.A., 2009. WiMMed, a distributed physically-based watershed model (II): Application examples. *in Environmental Hydraulics: Theoretical, Experimental & Computational Solutions*. CRC Press/Balkema, pp. 229-232.

Herrero, J., Aguilar, C., Polo, M.J. y Losada, M.A., 2007. Mapping of meteorological variables for runoff generation forecast in distributed hydrological modeling. *Hydraulic measurements and Experimental Methods*, New York, pp. 606-611.

Herrero, J., Millares, A., Aguilar, C., Díaz, A., Losada, M.A. y Polo, M.J., 2009a. WiMMed 1.0. Base teórica. Grupo de Dinámica Fluvial e Hidrología de la Universidad de Córdoba y Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales de la Universidad de Granada. [www.cuencaguadalfeo.com/publicaciones.html](http://www.cuencaguadalfeo.com/publicaciones.html)

Herrero, J., Polo, M.J., Moñino, A. y Losada, M.A., 2009b. An energy balance snowmelt model in a Mediterranean site. *Journal of Hydrology* 371, pp. 98-107.

Herrero, J., Millares, A., Moreno, I., Aguilar, C., Egüen, M. y Polo, M.J., 2010. Quantifying human-induced effects over hydrology in Mediterranean catchments through a physically based model. *HydroPredict 2010. 2<sup>nd</sup> International Interdisciplinary Conference on Predictions for Hydrology, Ecology and Water Resources Management*. Praga, pp. 84.

Millares, A., 2008. *Integración del caudal base en un muestreo distribuido de cuenca. Estudio de las aportaciones subterráneas en ríos de montaña*. Tesis Doctoral. Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales. Universidad de Granada. <http://www.ugr.es/~mivalag>

Millares,A., Polo, M.J., Losada, M.A., Aguilar, C. y Herrero, J., 2009. Caracterización del caudal base en zonas de alta montaña a partir de un análisis estacional de recesiones. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo. Vol. IX, ZNS'09*, pp. 417-424.

Navarro, L.C., 1983. "Algunos aspectos del uso y distribución de las aguas de Almería siglo XVI-XVIII", *Almotacín*, 2, pp. 83-88.

Polo, M.J., Herrero, J., Aguilar, C., Millares, A., Moñino, A., Nieto, S. y Losada, M.A., 2009. WiMMed, a distributed physically-based watershed model (I): Description and validation. *in Environmental Hydraulics: Theoretical, Experimental & Computational Solutions*. CRC Press/Balkema, pp. 225-228.

Rodríguez, J.A., 2008. *Sistemas de Inferencia Espacial de propiedades Físico-Químicas e Hidráulicas de los Suelos de Andalucía. Herramienta de Apoyo a la Simulación de Procesos Agro-Hidrológicos a Escala Regional*. Informe Final. Empresa Pública Desarrollo Agrario y Pesquero. Área de Modernización y Regadíos. Consejería de Agricultura y Pesca. Sevilla, 85 pp.

Rodríguez, J.A., 2009. Inferencia Espacial de propiedades Físico-Químicas e Hidráulicas de los Suelos de Andalucía. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo. Vol. IX, ZNS'09*, pp. 448-455.

Rutledge A.T. y Mesko T.O. 1996. *Estimated hydrologic Characteristic of shalof aquifer system in the valley and ridge, the Blue Ridge, and Piedmont phisigraphic provinces based on analysis of streamflow recession and baseflow*. Professional paper 1422-B. U.S. Geological Survey.

Tallaksen, L.M., 1995. A review of baseflow recession analysis. *J. Hydrol.* 165, pp. 349-370.

Wittenberg H, 1994. Nonlinear analysis of low flow recession curves. FRIENDS: Flow Regimes from International and Experimental Network Data. IAHS Publ. No 221:61