

LAGUNAS DEL PARQUE NACIONAL DE SIERRA NEVADA (GRANADA). PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN HIDROLÓGICA

A. Castillo⁽¹⁾; J. Benavente⁽¹⁾; M. C. Hidalgo⁽²⁾; J. Miranda⁽³⁾ y M. Jiménez⁽⁴⁾

- (1) Instituto del Agua de la Universidad de Granada. Edificio "Fray Luis de Granada". Ramón y Cajal, 4. 18071 Granada. Email: acastill@ugr.es/ ibenaven@ugr.es
- (2) Departamento de Geología. Universidad de Jaén. Escuela Universitaria Politécnica de Linares. Email: chidalgo@ujaen.es
- (3) CSIC. Estación Experimental de Zonas Áridas. Almería
- (4) Auster Outdoor, s.l. Email: manueljimenez@austeroutdoor.com

Resumen

Desde hace algunos años, se vienen generalizando las alarmas acerca de un muy probable cambio climático global, no se sabe bien aún si debido a causas antrópicas o naturales. En este contexto, se han intensificado los estudios sobre el clima e indirectamente sobre las respuestas del medio. El Parque Nacional de Sierra Nevada es un enclave de alta montaña que permanece prácticamente inalterado, lo que lo convierte en un buen observatorio climático e hidrológico.

En el momento actual, el equipo que firma esta comunicación está trabajando en la caracterización hidrológica de las lagunas de Sierra Nevada, como primer paso para establecer y consolidar una sistematización de medidas que puedan, con los años, servir de diagnóstico de posibles cambios hidrológicos y consecuentemente climáticos, a nivel regional. En concreto, se están instalando algunos hitos de referencia para el control del nivel, temperatura y conductividad de las aguas. En este trabajo se presentan los resultados de un primer reconocimiento, realizado en septiembre y octubre de 2002, junto a las previsiones de estudios para años próximos.

Palabras clave: Sierra Nevada, lagunas glaciares, hidrología, cambio climático

INTRODUCCIÓN. ALGUNAS CONSIDERACIONES PRELIMINARES

Sierra Nevada es un sistema montañoso (con cumbres superiores a los 3.000 m s.n.m.) de aproximadamente 2.000 km² de extensión, que se localiza en el Sureste de la Península Ibérica, donde ocupa parte de las provincias de Granada y Almería. Desde el punto de vista geológico, ocupa la zona interna de las Cordilleras Béticas, siendo los materiales aflorantes predominantemente metapelitas del Complejo Nevado-filábride, y, en menor proporción, materiales carbonáticos del Complejo Alpujárride. Desde el punto de vista hidrológico (Castillo *et al.*, 1996), Sierra Nevada

vierte sus aguas a la cuenca mediterránea (vertiente Sur) y, en menor medida, también a la atlántica (vertiente Norte). Las aportaciones pluviométricas son predominantemente sólidas por encima de los 2.200 m s.n.m., siendo máximas en la línea de cumbres, en la que el módulo pluviométrico se ha estimado próximo a 1.300 mm. Los recursos hídricos del macizo son del orden de 700 hm³/año. La escorrentía superficial y subterránea está fuertemente condicionada por procesos nivales (innivación-deshielo)

La escorrentía subsuperficial es mayoritaria en la zona de altas cumbres (por encima de los 2.500 m de altitud), debido fundamentalmente a la lenta liberación de agua en el deshielo y a la existencia de extensos (y a veces también potentes) depósitos clásticos de diferente origen (glaciares y periglaciares). Este flujo subsuperficial da lugar a multitud de surgencias (Adarve *et al.*, 1997; Castillo y Fedeli, 2002), agrupadas a cotas concretas, generalmente en las terminaciones de los citados cuerpos clásticos. Estas surgencias son conocidas localmente como "borreguiles", ya que alrededor de las mismas se han instalado praderas turbosas muy apetecibles por los herbívoros domésticos y también salvajes del Parque Nacional. Todas estas surgencias de alta montaña constituyen el origen de numerosas lagunas y chorreras, origen a su vez de los ríos de Sierra Nevada, cuyos regímenes de agotamiento están íntimamente ligados al de los manantiales antes citados (Adarve *et al.*, 1998).

En las partes más elevadas, normalmente al repié del último escarpe rocoso de la crestería del macizo, existen multitud de cubetas de diferentes tamaños, labradas por la erosión glacial, en lo que correspondería a cubetas de sobreexcavación. En esas formas tipo "cuchara", más o menos cerradas, quedan atrapadas las aguas del deshielo y las de las surgencias del contorno, dando lugar a multitud de lagunillos efímeros y a una treintena de lagunas mayores, de aguas prácticamente permanentes. Durante los meses de Septiembre y Octubre de 2002 se reconocieron y tomaron datos de una veintena de estas lagunas de aguas permanentes del Parque Nacional de Sierra Nevada (tabla 1). En las lagunas que presentaron niveles de agua no estables (y en alguna de las estables también) se instalaron hitos topográficos para controlar los niveles de las láminas de agua. Los hitos consistieron en un tornillo roscado a piedra, con cabeza de 1 cm² de superficie, de casi imposible localización (para lo que se realizaron fotografías de detalle de los emplazamientos). En todas las lagunas se tomaron los siguientes datos de campo: altitud, temperatura y conductividad de las aguas (en uno o varios puntos), anchura y longitud máxima de la lámina de agua (con

telémetro láser), y distancia desde el hito hasta el nivel del agua y hasta el máximo observable (en una dirección previamente establecida).

Del mismo modo, se hicieron una serie de observaciones de interés hidrológico, tales como morfología y génesis de las lagunas, existencia y tipo de aportaciones y de descargas visibles, amplitud de la oscilación de niveles, tipología de cierres y riesgos de fugas, etc.

Nº	NOMBRE	Fecha	Cond.	Temp.	Alt.	Larg.	Anch.	TIPO
1	Aguas Verdes*	19-9-02	39,0	8,5	3.055	77	28	Abierta
2	Gr. De Río Seco*	19-9-02	20,2	6,3	3.025	125	48	Abierta; aliv. temporal
3	La Caldera*	19-9-02	36,6	9,4	3.020	134	50	Cerrada
4	La Mosca	19-9-02	46,1	9,8	2.905	--	--	Abierta
5	Lanjarón*	30-9-02	19,4	8,1	2.980	50	27	Abierta; aliv. temporal
6	Charca Pala	30-9-02	21,8	11,5		--	--	Abierta; aliv. temporal
7	Tajos Altos*	30-9-02	18,5	8,8	2.900	21	10	Abierta; aliv. temporal
8	Cuadrada*	30-9-02	9,5	9,4	2.830	60	32	Abierta; aliv. temporal
9	El Caballo*	30-9-02	13,4	10,2	2.830	62	52	Cerrada
10	Gr. De La Virgen*	30-9-02	97,0	7,5	2.950	63	10	Abierta; aliv. temporal
11	Las Yeguas	30-9-02	55,2	9,0	2.890	--	--	Artificial
12	Hondera (7 lag.)	7-10-02	23,0	7,2	2.895	150	40	Abierta
13	Innominada (7 lag.)	7-10-02	30,0	8,8	2.935	39	8	Abierta
14	Borreguil (7 lag.)	7-10-02	13,5	9,0	2.980	60	35	Abierta
15	Del Tanto (7 lag.)*	7-10-02	13,1	9,3	3.025	41	8	Abierta; aliv. temporal
16	Alterra (7 lag.)*	7-10-02	10,8	8,0	3.060	78	12	Cerrada
17	De Colores (7 lag.)*	7-10-02	12,8	11,0	3.020	60	50	Abierta; aliv. temporal
18	Culo Perro (7 lag.)	7-10-02	30,4	11,4	2.975	67	40	Abierta
19	Peñón Negro*	7-10-02	24,5	12,3	2.825	54	27	Abierta; aliv. temporal

*Tabla 1.- Lagunas reconocidas durante el verano de 2002; Conductividad en microS/cm a 25 °C; temperatura en °C; resto de datos en m., * Lagunas en las que se instalaron hitos para medida de nivel del agua*

A partir de Junio de 2003 se reanudará la campaña de observaciones y toma de datos de las lagunas, con el objetivo de completar la revisión de todas las lagunas de aguas prácticamente permanentes del macizo (tabla 2), que según nuestras

estimaciones son del orden de la treintena; complementariamente se realizará una segunda campaña de muestreos en las ya reconocidas en el 2002. En este año 2003 se tiene previsto obtener la morfometría precisa de las lagunas, utilizando un GPS avanzado (localización, orientación, perímetro, forma y superficie), información de la que no se posee hasta el momento. También se tomarán muestras de agua (en diferentes épocas) para analizar contenidos isotópicos y comprobar diversas hipótesis hidrogeológicas de tasas evaporativas, fugas y conexiones hídricas sobre las que empezamos a trabajar.

NOMBRE LAGUNA	TÉRMINO MUNICIPAL
Majano	Capileira
Media de Río Seco	Capileira
Goterón	Trevélez
Caldereta altera	Trevélez
Caldereta media	Trevélez
Caldereta hondera	Trevélez
Juntillas	Trevélez
Vacares	Trevélez
Mojón de Trigo	Güéjar Sierra
Larga	Güéjar Sierra
Valdeinfierno	Güéjar Sierra
Veleta	Güéjar Sierra
Nacimiento	Dúrcal

Tabla 2.- Lagunas que se tiene previsto reconocer en el verano de 2003

Las lagunas reconocidas se han clasificado, desde el punto de vista hidrológico, en base a la presencia o ausencia de aliviadero, y dentro de las primeras, en el carácter permanente o efímero (temporal) de este. Esta clasificación es similar a la de lagunas abiertas (con aliviadero y normalmente también con entradas visibles) y cerradas (sin aliviadero y habitualmente también sin entradas visibles).

El carácter permanente o estacional de las aguas es naturalmente complejo, y está íntimamente relacionado con la climatología anual. No existe periodo de control de las lagunas que nos hubiera permitido relacionar sus niveles con la climatología, ni, por tanto, las diferentes probabilidades de conservar aliviaderos y, en última instancia, láminas de agua. El posible carácter inestable del estado de impermeabilización de vasos y pantallas de cierre, sobre todo por causas de tectónica activa, es un factor adicional que complica el asunto; algunas lagunas muestran indicios de tener una impermeabilización deficiente, que les hace perder el agua al alcanzar ciertas cotas de

agua; por contrapartida, otras lagunas parecen tener una buena impermeabilización, achacándose los descensos de nivel únicamente a pérdidas evaporativas.

Una clasificación genética de las lagunas es más compleja; para lagunas glaciares del tipo de las de Sierra Nevada, es usual su clasificación en lagunas de circo y de valle; en Sierra Nevada, las morfologías de circo y de valle de diversos episodios se solapan en algunos sectores; no obstante, la inmensa mayoría de las lagunas de Sierra Nevada podrían adscribirse al tipo de circo. Generalmente, se localizan al repié de los escarpes de la crestería, instaladas en el centro de los antiguos circos glaciares.

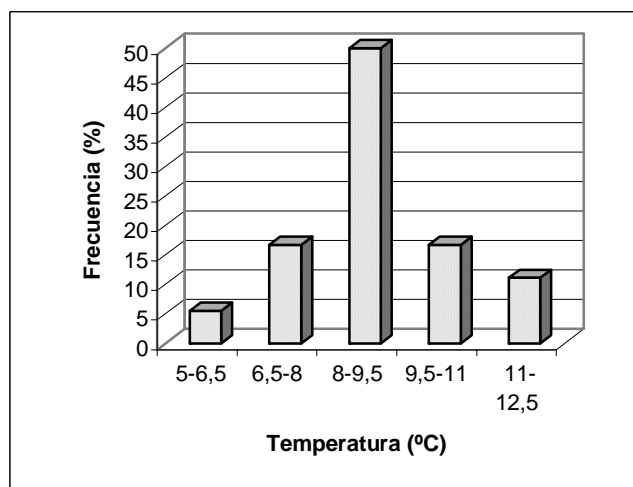
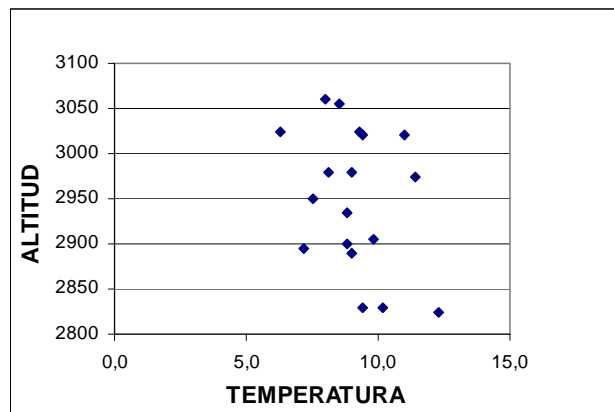
El control evolutivo de la temperatura de las aguas de algunas de las lagunas, y de forma muy especial también de ciertas surgencias (borreguiles), constituya un magnífico indicador climático, ya que dichas temperaturas presentan un gran poder de integración (areal y temporal) y una sensible inercia, por lo que pueden considerarse como valores representativos y característicos a escala intraanual (Fedeli y Castillo, 1997 y 1998; Castillo, 2000). En su variación interanual deben estar comprometidos cambios en la dinámica innivación-deshielo (fechas de inicio e intensidad de los mismos) y en, menor medida, en la temperatura y radiación estival.

RESULTADOS PRELIMINARES

De los datos obtenidos hasta el momento pueden destacarse los siguientes aspectos:

- a) En cuanto a sus tamaños (muy disminuidos por haber sido medidos a final del estiaje), la laguna más extensa fue la de La Caldera (134 x 50 m), seguida de cerca por la Hondera de Siete Lagunas (150 x 40) y por la Grande de Río Seco (125 x 48), todo ello a falta de cálculos más precisos de superficie con GPS; la más larga la Hondera (150 m), la más ancha la Caldera, Río Seco y la de los Colores de Siete Lagunas (50 m). Las mayores profundidades de agua y también las máximas oscilaciones de nivel se observaron en las lagunas cerradas, y dentro de ellas en La Caldera.
- b) Por lo que respecta a la temperatura del agua, la más fría fue la Altera de Siete Lagunas (8,0 °C) y la más cálida la de Peñón Negro (12,3 °C), coincidiendo con

la de mayor y menor altitud de sus emplazamientos (3.060 m frente a 2.825 m). No obstante, la correlación de la temperatura con la altitud no fue buena (figura 2), hecho que ya había sido puesto de manifiesto en investigaciones anteriores para manantiales de la alta montaña de Sierra Nevada (Fedeli y Castillo, 1997). Varias son las causas de esta falta de ajuste, entre las que destacan la orientación de las cuencas de recepción, con mucha influencia en el inicio e intensidad de los deshielos, y la naturaleza de la capa de alteración (acuífero) bajo la que se producen los flujos subsuperficiales de alimentación (ocultos o visibles) de las respectivas lagunas. En este sentido, los glaciares rocosos y cascajares de buen espesor favorecen la conservación de aguas más frías (y de menor conductividad), al preservar las aguas en zonas de homotermia tras su deshielo y favorecer su rápida circulación (altas velocidades de flujo). En la figura 3 se presenta un histograma de frecuencias, en el que se observa una distribución normal, con un intervalo dominante comprendido entre 8 y 9,5 °C.



Figuras 2 y 3.- Arriba: gráfico temperatura-altitud; abajo: histograma de frecuencias de la temperatura. Lagunas de Sierra Nevada en Septiembre-Octubre de 2002

c) En relación a la conductividad (salinidad) de las aguas, las de valores extremos fueron la laguna Cuadrada (9,5 microS/cm) y la Grande de La Virgen (97 microS/cm). Tampoco se observó en este caso correlación significativa ni con la temperatura de las aguas ni con la altitud (figuras 4 y 5). Para esta variable, los datos obtenidos en otras investigaciones sugieren que la mejor correlación se obtiene con la superficie de las diferentes cuencas de alimentación (a mayor superficie mayor conductividad), si bien esta relación se halla alterada a su vez por las velocidades de flujo, mayores a través de glaciares rocosos y cascadas potentes (que ofrecen aguas de menor conductividad, y más frías, como se comentó anteriormente); en cualquier caso, estas relaciones todavía no se han estudiado con detalle para las lagunas de Sierra Nevada. En la figura 6 se presenta un histograma de frecuencias, en el que se puede observar que las conductividades mayoritarias son las comprendidas hasta 40 microS/cm.

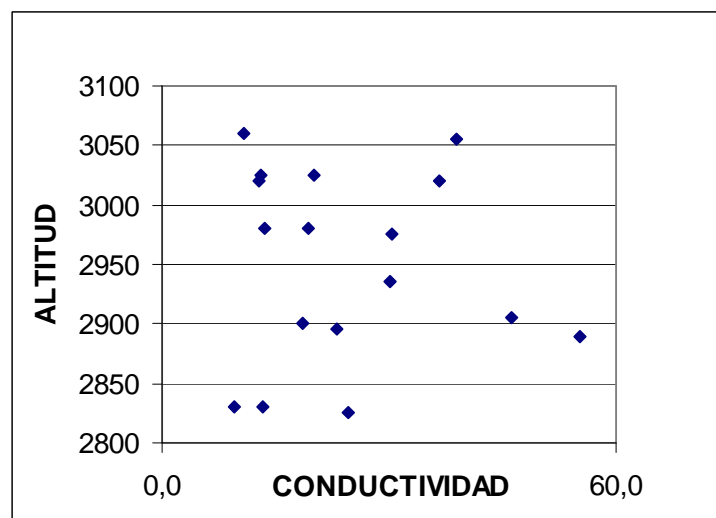
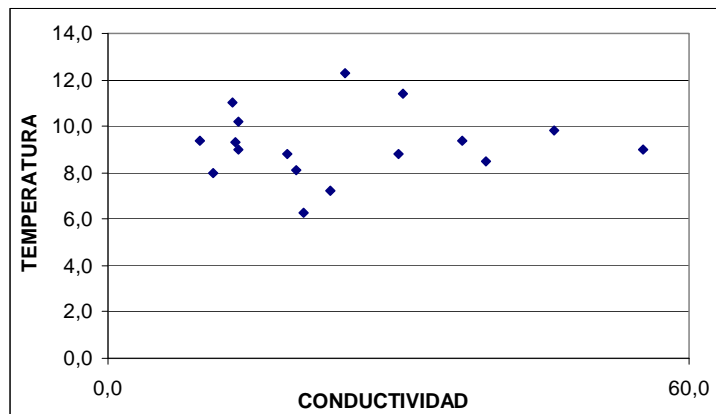


Figura 4 y 5.- Relación de la conductividad con la temperatura (arriba) y con la altitud (abajo). Lagunas de Sierra Nevada en Septiembre-Octubre de 2002

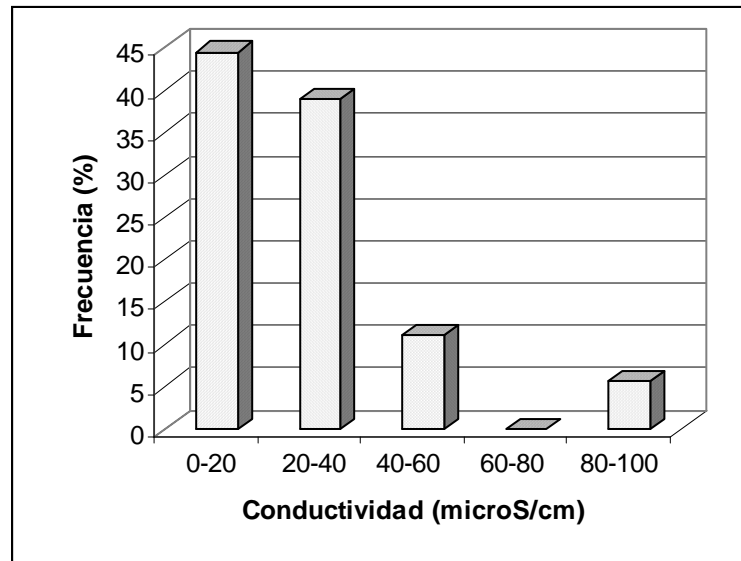


Figura 6.- Histograma de frecuencias de la conductividad. Lagunas d Sierra Nevada en Septiembre-Octubre de 2002

CONCLUSIONES

Aún es pronto para obtener conclusiones sobre la hidrología de las lagunas de Sierra Nevada, y menos aún sobre la posible dinámica de cambio climático en la región.

Los reconocimientos realizados evidencian que la inmensa mayoría de las lagunas de Sierra Nevada están asentadas en cubetas de sobreexcavación (en algún caso con morrenas frontales), por lo que podrían ser definidas como lagunas de circo. Esta es la razón de que se encuentren a cotas muy altas, generalmente al repié de los escarpes cimeros de la cordillera, entre los 3.060 y 2.900 m de altitud.

Una buena clasificación hidrológica de las lagunas es la de abiertas y cerradas, entendemos por ello las que poseen aliviadero (y generalmente también entradas visibles) o carecen de él (y generalmente también de entradas visibles). Esta casuística tiene mucha influencia en el régimen hídrico, así como en la físico-química de las aguas, y consecuentemente también en la dinámica ecológica de las mismas.

Algunas lagunas presentan oscilaciones importantes de nivel, junto a una aparentemente buena impermeabilización del vaso (ausencia de fugas), lo que las convierte en excelentes indicadoras del comportamiento hidrológico anual de las cumbres de Sierra Nevada (precipitaciones, innivación, deshielo, evaporación, etc), lo

que será un indicio fiable de la hidrología de la región más próxima. El control periódico de niveles, complementado con el de otros valores físico-químicos de las aguas (especialmente temperatura y algunos isótopos ambientales), permitirá obtener un índice sobre la climatología e hidrología del macizo y sus previsibles cambios en el futuro.

El control evolutivo de la temperatura de las aguas en algunas lagunas, y de forma muy especial también en ciertas surgencias (borreguiles), constituye un excelente indicador climático, ya que dichas temperaturas presentan un gran poder de integración y una sensible inercia, por lo que pueden considerarse como valores representativos y característicos a escala intraanual. En última instancia, en su variación interanual deben estar comprometidos cambios en la dinámica innivación-deshielo (fecha de inicio e intensidad de ambos fenómenos) y en, menor medida, en la temperatura y radiación estival.

De forma complementaria, las oscilaciones anómalas de nivel (no relacionadas con la climatología) serán un síntoma de posibles cambios en la impermeabilización de los vasos. En este sentido, la tectónica activa a que aún está sometido el macizo es un factor a tener en cuenta, si bien es cierto que sus posibles efectos sobre la impermeabilización de las lagunas seguramente tiene periodos de recurrencia muy superiores a los de una vida humana. No obstante, se sabe que algunas lagunas desaparecieron por esta causa (al parecer en coincidencia con grandes terremotos), y otras no almacenan apenas agua por importantes pérdidas a través del vaso.

REFERENCIAS

Adarve, A.; Castillo, A.; Gisbert, J. y Al-Alwani, G. 1997. Characterization of subsurface flow in schists in Sierra Nevada (Granada, Spain) by depletion curves. In: *Hydrogeology of hard rocks*. Pub. International Association of Hydrogeologist. Ed. Yelamos & Villarroya. 115-124.

Adarve, A.; Castillo, A. y Fedeli, B. 1998. Análisis de curvas de agotamiento en dos ríos de Sierra Nevada (Granada; España). *Geogaceta*, 23, 3-6

Castillo, A. 2000. Sobre las surgencias del dominio glaciar relicto de Sierra Nevada (Dílar; Granada). *Geotemas*, 1 (2): 59-62

Castillo, A.; Del Valle, M.; Rubio, J.C. y Fernández Rubio, R. 1996. Síntesis hidrológica del macizo de Sierra Nevada (Granada y Almería). *1ª Conf. Intern. Sierra Nevada*, I: 389-417

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

Fedeli, B. y Castillo, A. 1997. Different kinds of morphogenetic springs in the upper Dilar valley (Sierra Nevada, Granada, Spain). In: *Hydrogeology of hard rocks*. Pub. International Association of Hydrogeologists. Ed. Yelamos & Villarroya. 159-167.

Fedeli, B. y Castillo, A. 1998. Condiciones de surgencia en una cuenca esquistosa de alta montaña (Sierra Nevada; Granada, España)". *Geogaceta*, 23: 47-50