

# Estimación de caudales ecológicos en dos cuencas de Andalucía. Uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas

D. Baeza Sanz<sup>1</sup>, P. Vizcaíno Martínez<sup>2</sup>

(1) Fundación Nueva Cultura del Agua (FNCA). Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza.

(2) Ecohidráulica S.L. Gaztambide 46, 28015 Madrid.

➤ Recibido el 23 de abril de 2007, aceptado el 11 de enero de 2008.

**Estimación de caudales ecológicos en dos cuencas de Andalucía. Uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas.** Las líneas de actuación que en políticas de aguas emanan de la Directiva Marco de Aguas (Directiva 2000/60/CE) obligan a considerar nuevos enfoques en las metodologías hasta ahora empleadas en la gestión del agua, incluyendo elementos innovadores y de mayor eficacia como la utilización conjunta de aguas superficiales, subterráneas y los caudales ambientales. Varias instituciones y administraciones estatales y andaluzas están llevando a cabo una serie de trabajos de investigación en dos sistemas de explotación de recursos hídricos que se localizan en la Comunidad Autónoma de Andalucía. Localizados en la provincia de Jaén y Granada ambos presentan peculiaridades interesantes en cuanto a la circulación del agua subterránea. El objetivo de estos trabajos es desarrollar y aplicar tecnologías que integren criterios medioambientales (caudales ecológicos), económicos (coste del agua suministrada) y de gestión. Los resultados muestran como, aplicando criterios de eficacia y uso conjunto, es posible mantener unos caudales ambientales en el primer sistema, y como los caudales ambientales que se proponen en el segundo sistema serían fundamentales para mantener la estructura y composición del ecosistema ripario de la cuenca estudiada.

Palabras clave: Régimen ecológico de caudales, uso conjunto, sistema hídrico, gestión integrada.

**Environmental flow estimation in two Andalusia basin. Combined superficial and groundwater use.** Water policies derived from the Water Framework Directive (Directive 2000/60/CE) emphasize the need to incorporate new approaches in water management, including innovative and more efficient approaches such as combined use of surface and ground water, and environmental flow. A number of Spanish and Andalusian institutions and administrations are currently developing research programs on 2 water resource systems in Jaén and Granada (Andalusia). Both of them show interesting peculiarities in terms of ground water flows. The objective of this work is to develop and apply technologies that integrate ecological (environmental flow), economic (cost of water) and management criteria. Results from the Jaén area show that the maintenance of environmental flows is possible when the principles of efficiency and combined use are applied; in Granada, the recommended environmental flow is crucial to maintain the structure and composition of riparian ecosystems.

Key words: ecological water flow regime, combined use, hydrological system, integrated management.

## El papel de los caudales ambientales en la gestión del agua

La integración de los caudales ambientales en los proyectos de gestión de agua, empieza a ser entendida por la Administración de los recursos hídricos en España (i.e., Plan Nacional de Restauración e Instrucción para el estudio e implantación de caudales ecológicos). Las alternativas que surgen de considerar todos los recursos disponibles (aguas superficiales, subterráneas, depuración, desalación, entre otros) amplían las posibilidades de suministro y quita tensión sobre nuestros deteriorados ecosistemas acuáticos superficiales, posibilitando el mantenimiento de unos caudales que permitan conservar la estructura y funcionamiento de estos sistemas. Como se ha comprobado en algunas cuencas andaluzas, el uso conjunto de las aguas subterráneas y superficiales, abre muchas posibilidades con el objetivo de garantizar el suministro, mantener la calidad de las aguas, contemplar el coste de las infraestructuras hidráulicas. También considera los aspectos ambientales, lo que puede llevarnos a un sistema de actuación en la gestión del agua, ambiental y socialmente, mucho más equilibrado, positivo y con mayores posibilidades de garantía del suministro.

Muchos de nuestros sistemas hídricos adolecen de una correcta gestión, aunque en muchos casos se ha comprobado que, cuando se barajan correctamente todas las alternativas posibles para satisfacer las demandas, nuestros recursos hídricos son suficientes, tanto para cumplir sus funciones sociales y económicas, como para mantener ecosistemas fluviales saludables, diversos y funcionales (Esteban y Prat, 2006). Una de las posibilidades para solucionar problemas concretos de abastecimiento, pasa, en España, por un adecuado uso del agua subterránea. Son numerosos los casos en el sureste español, de acuíferos sobreexplotados. Sin embargo, en este país, muchos trabajos demuestran los beneficios del uso de las aguas subterráneas, no sólo para aplicarlos en el abastecimiento urbano con más garantías, o para la agricultura con un menor coste económico, sino también como una solución para mejorar el estado de nuestros ecosistemas superficiales (Fornés *et al.*, 2005).

Los caudales ambientales o ecológicos son una herramienta que nos va a permitir cuantificar las restricciones al uso del recurso (Artículo 59.7 Texto refundido de la Ley de Aguas 10/01 de 5 de julio). También nos permiten cuantificar las demandas ambientales de la cuenca (García de Jalón, 1990); así pueden ser utilizados en la gestión, incluyendo una limitación a la extracción de recursos superficiales, y animando a los gestores a la búsqueda de soluciones, indagando en todas las alternativas posibles, para poder implementarlos y así conseguir los objetivos de conservación de los sistemas hídricos que nos impone la DMA, lo que justifica su consideración en los sistemas de gestión.

Este trabajo se ha desarrollado en varias cuencas de Andalucía: por un lado en el sureste de Jaén, en el sistema hidrológico denominado Quiebrajano-Víboras, donde el Instituto Geológico y Minero Español (IGME) había llevado a cabo trabajos de optimización de recursos para el abastecimiento de la Comarca de Martos y de la Mancomunidad del Quiebrajano. Por otro lado, también se ha estudiado la cuenca del río Trevélez en Granada. Los objetivos del mismo han consistido inicialmente en la estimación de los requerimientos ambientales de estas cuencas, para posteriormente valorar la posibilidad de implementación de los regímenes ecológicos calculados en los sistemas de gestión de las mismas. Los resultados sobre la consideración de incorporar los criterios ambientales en el sistema están más avanzados en las cuencas de los ríos de Jaén que en la cuenca del Trevélez, ya que en esta última el conocimiento del sistema de explotación y el Plan de gestión de los Recursos hídricos, no se encuentra tan avanzado como en la de los otros tres ríos; aunque existe ya un Plan integral de gestión para la cuenca del Guadalfeo (Polo *et al.*, 2006). Una vez conocidos los valores de las demandas ambientales, se llevaron a cabo los trabajos de integración de éstos en el sistema de gestión, para conseguir la optimización en la gestión de los recursos hídricos que redunde en la protección de los ecosistemas. Esto ha sido más complicado en el río Trevélez, tanto por la ausencia de datos sobre el aporte subterráneo, y especialmente por la dificultad que se ha encontrado a la modificación de los usos tradicionales del agua y de los aportes subterráneos.

## Área de estudio

### El Sistema Quiebrajano-Víboras (provincia de Jaén)

El Sistema Quiebrajano-Víboras constituye el entramado hidráulico más importante de la provincia de Jaén (**Fig. 1**). Este sistema pertenece a la cuenca del Guadalquivir en la provincia de Jaén. Los tramos sobre los que se desarrollaron los trabajos de campo, se situaron en tramos de los ríos: Frío que es afluente del Quiebrajano, (que a partir del puente de la Sierra es conocido como Jaén), y éste a su vez del Guadalbullón, tributario del Guadalquivir; el río Víboras y el San Juan, son tributarios del Guadajoz, que a su vez lo es del Almenidilla y éste del Guadalquivir.



**Figura 1.** Localización de los ríos Frío, Víboras y San Juan en el Sistema Quebrajano-Víboras.

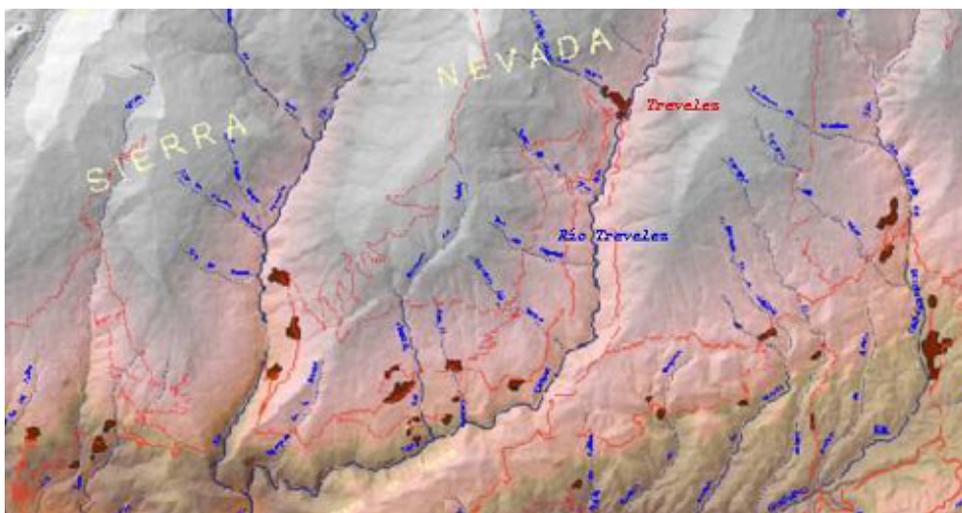
La cuenca del río Frío hasta su confluencia con el río Jaén, es pequeña (10.083 ha). Cuenta con parajes de excepcional belleza e interés ambiental, como los cañones del Mingo. Se encuentra sobre la Unidad Hidrogeológica número 05.066 Grajales-Pandera, y se estima que la aportación subterránea natural a este río es de 3,96 hm<sup>3</sup>/año. El tramo elegido se sitúa justo aguas abajo de los sondeos de La Merced, y de la zona de elevación de aguas de Mingo, que restan agua al sistema, y el objetivo es estimar qué caudal se tendría que dejar en el cauce, para que mantenga la calidad ambiental del tramo, una vez este sistema de sondeo esté funcionando.

El río Víboras y el San Juan comprenden una cuenca de 28.880 ha, hasta su confluencia en el Guadajoz, los recursos subterráneos son aportados por la subunidad 08 Gracia morenita de la U.H. 05.70 Gracia-Ventisquero. La aportación subterránea de este acuífero a los cauces hasta el embalse del Víboras se estima en 17,74 hm<sup>3</sup>/año. También están afectados por sondeos que extraen agua de la unidad, los sondeos del Víboras y los nuevos de Gracia-Morenita, por lo que los tramos elegidos también se situaron aguas abajo de estas captaciones para determinar el régimen ambiental, una vez que el río ha sufrido detracciones de caudal por estas infraestructuras. Uno de los tramos se localizó en la zona de captación del Víboras y el otro en el nacimiento del río San Juan.

#### Cuenca del Trevélez

La cuenca del Trevélez se sitúa en la vertiente meridional de Sierra Nevada, en la zona centro-sur de la provincia de Granada (**Fig. 2**). El río tiene una longitud de 33 Km y su cuenca ocupa una superficie de 23.460 ha. El río Trevélez es afluente del Guadalfeo, por lo que pertenece a la cuenca mediterránea, incluido en la red hidrográfica del sur en la provincia de Granada. Nace en el Puerto de Trevélez a unos 3.180 m. de altitud, siendo el punto de mayor cota de la cuenca el pico Horcajo de Trevélez con 3.182 m. Discurre en la mayor parte de su trayecto por zonas montañosas de fuerte pendiente en la Alpujarra alta, siendo predominantes las pendientes escarpadas, con desniveles del 30-50% pero alcanzándose en algunos puntos las muy escarpadas con más del 50% de desnivel. Al alcanzar las proximidades de la localidad de Trevélez apacigua sus aguas en algunos parajes, lo que permite encontrar tramos de río de aguas más remansadas con lugares excelentes para la freza de las truchas.

Geológicamente la cuenca del río Trevélez pertenece a los complejos de Sierra Nevada en cabecera y Alpujarroide en el sur. La composición geológica es muy uniforme y sencilla, formada principalmente por micaesquistos, con otros materiales como el granito. Esta composición geológica ocupa prácticamente toda la cuenca; en los márgenes del río encontramos aluviones recientes, formados por gravas, arenas arcillas y limos; aunque de poca potencia y extensión son muy importantes desde el punto de vista hidrogeológico. Este acuífero somero, que ocupa poca extensión relativa en la cuenca, no tiene la trascendencia cuantitativa en el suministro de recursos que proporcionan los acuíferos de las cuencas de los ríos de Jaén; sin embargo sí lo es desde el punto de vista social y, también como aporte hídrico que aguas abajo permite el mantenimiento de una humedad freática y sostiene una variedad vegetal característica de las laderas de las Alpujarras.



**Figura 2.** Cuenca del río Trevélez.

## Problemática ambiental

En cualquiera de los dos sistemas estudiados encontramos un esquema similar, mientras por un lado aumentan las demandas, una incorrecta gestión de los recursos hídricos está provocando una presión excesiva sobre los ecosistemas fluviales superficiales, llegándose en algunas épocas del año a secarse los cauces, debido a las extracciones excesivas de agua que se producen.

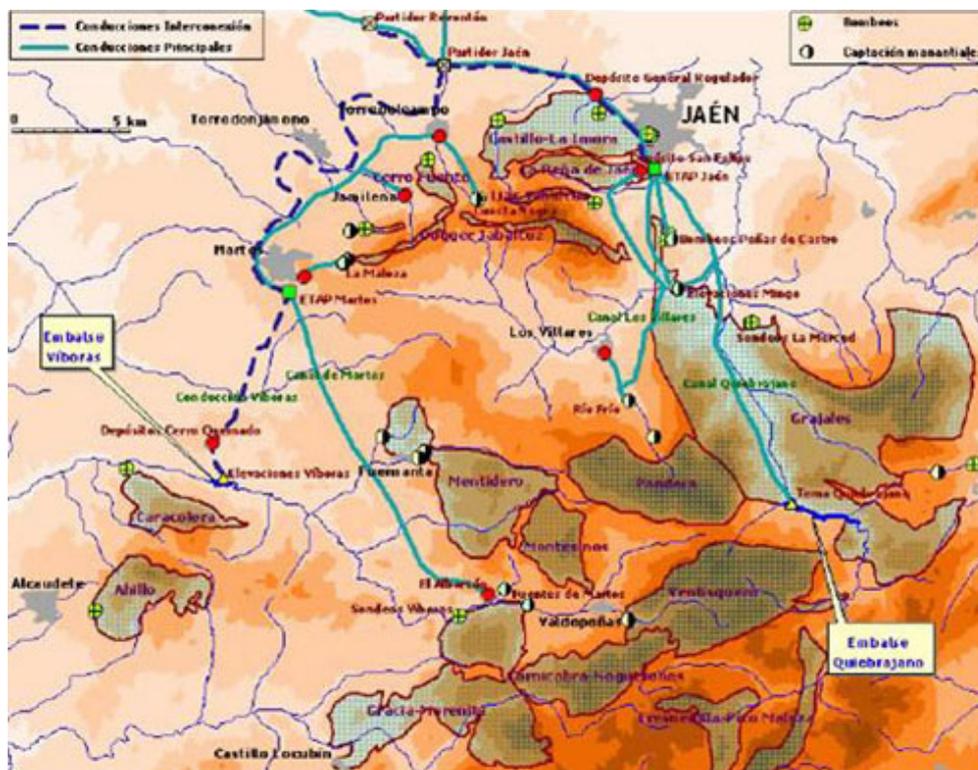
La explotación del sistema Quiebrajano-Víboras ha causado algunos problemas con repetidas situaciones de desabastecimiento en poblaciones. Esto provocó la ejecución de diversas actuaciones desde el año 1998, para la interconexión de los sistemas del Víboras y Quiebrajano. Sin embargo, no se habían planteado hasta el momento pautas de gestión conjunta aguas superficiales-subterráneas. Como se ha comprobado la utilización coordinada de las aguas superficiales y subterráneas evitaría llegar a situaciones extremas en las que los cauces queden secos.

En la cuenca del Trevélez, el aumento poblacional de los pueblos turísticos, ha provocado un aumento en la demanda de agua y una mayor necesidad de regulación, lo que unido a los requerimientos hídricos tradicionales están suponiendo para el sistema fluvial una presión excesiva. Esto provoca varios problemas ambientales. El primero que se está detectando es la modificación de los caudales en el río, que como hemos dicho en temporadas largas y en determinados tramos llega a secarse, algo que no se producía en décadas pasadas con un uso más limitado de los recursos. Las conexiones que se establecen entre las variables que componen el sistema natural del valle del Trevélez hacen que el funcionamiento del sistema sea complejo, ya que se sospecha que han sido los usos tradicionales del agua, al recargar el acuífero, los que han contribuido al desarrollo de una variedad vegetal en este espacio que no existiría, tal y como la conocemos ahora, si este uso no se produjera de esta forma. El riego por inundación de los campos y prados favorece, por tanto, el mantenimiento de estas comunidades (Ben Sbih *et al.*, 1996). Existe una gran presión para que este sistema se mantenga funcionando tal y como se hace ahora.

En esta cuenca aún no se han producido actuaciones estructurales, sino que se prefiere, dada su complejidad, comenzar por una ordenación de los recursos. Una vez realizada la valoración de las demandas, se considerará la posibilidad de cubrirlas, respetando los caudales ambientales que deben mantener el buen estado ecológico de los ecosistemas fluviales.

## Metodología

El trabajo que se ha llevado a cabo en estas cuencas debe cubrir dos objetivos principales: por un lado, determinar los requerimientos ambientales para el mantenimiento de la estructura y funcionamiento de los ecosistemas afectados, lo que va a condicionar todo el sistema de explotación, ya que como dice la ley estos volúmenes son restricciones al uso del agua en el resto de servicios. Por otro lado, se va a integrar las necesidades ambientales, especialmente los requerimientos de caudal, en la planificación de los sistemas Quebrajano-Víboras, a partir de las mejoras que se esperan obtener de las estrategias de los nuevos esquemas de gestión, como por ejemplo el uso conjunto (**Fig. 3**).



**Figura 3.** Infraestructura del sistema Quebrajano-Víboras. Plano cedido por cortesía de INCISA.

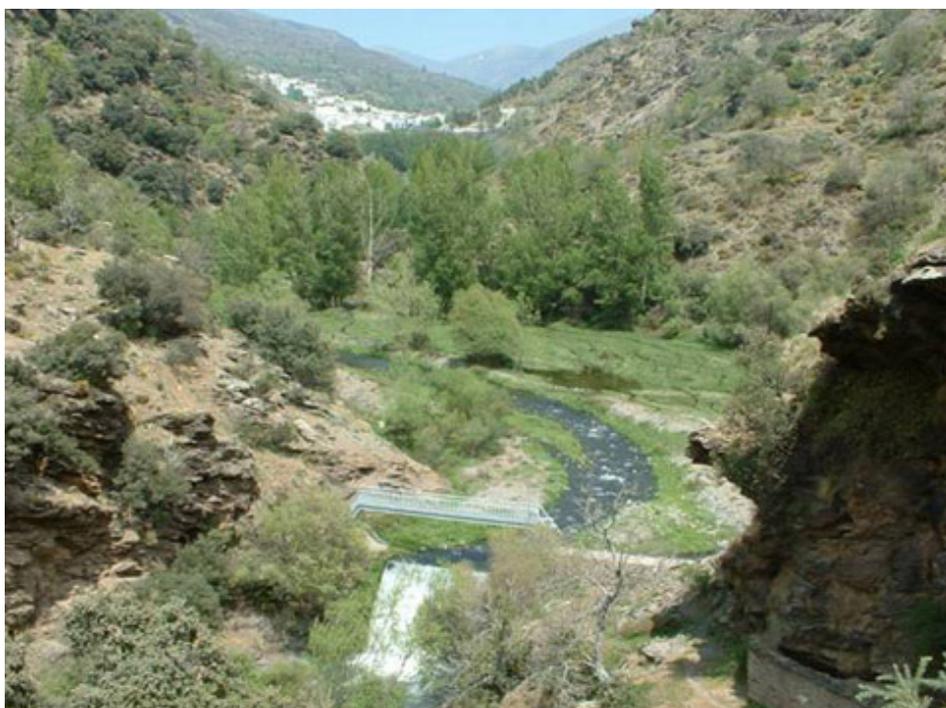
En el trabajo de establecimiento de los caudales ecológicos se precisa primero, elegir el método de trabajo. En todos los ríos se utilizó el método IFIM (García del Jalón, 1990), puesto que se excluyó la posibilidad de utilizar métodos hidrológicos por la ausencia de datos fiables (García de Jalón, 2003). Con el método IFIM se trata de obtener el valor de los cambios que se producen en variables del sistema al modificar los caudales (Bovee, 1982; Stalnaker, 1994). Las variables que se midan dependerán de qué resultados se quieran obtener o qué objetivos nos propongamos. Posiblemente lo más utilizado es observar la evolución de las variables hidráulicas que conforman el hábitat de alguna especie con el caudal; para ello se utilizan herramientas de simulación, como RHYHABSIM (Jowett, 1998) o River-2D (Steffler *et al.*, 2000) en las que además de obtener las variaciones hidráulicas al modificar los caudales circulantes, se pueden introducir las curvas de preferencia de la fauna y obtener también la variación del hábitat de la especie objetivo elegida, como condicionante para la elección del mejor caudal, que cumpla con los objetivos del trabajo.

El método necesita realizar una simulación sobre una topografía del cauce que debe introducirse en el programa; para ello se necesita elegir los tramos sobre los que se tomarán los datos. Esta elección se realiza a dos escalas; primero el segmento de río afectado por las detracciones de caudal; en el caso de los ríos de Jaén, como ya hemos citado, estos segmentos estaban aguas abajo de los sondeos o elevaciones de agua que iban a limitar la aportación de recursos al cauce; en el caso del Trevélez fueron varios los puntos elegidos, puesto que las detracciones de caudal son varias en la cuenca urbano y agrícolas. Además del criterio de la disminución de caudal se situaron estaciones de trabajo en puntos donde previamente se han realizado muestreos de calidad de aguas tanto físico-químicos como biológicos, (en este último caso utilizando macroinvertebrados como indicadores), estos puntos se usarán como control, para un nuevo Plan de Recursos de Sierra Nevada (Plan de Desarrollo Sostenible del Parque Natural de Sierra Nevada, 2004). Dentro de los segmentos de río, se realiza una segunda elección, en este caso de tramo; para ello se usan criterios de máxima representatividad, es decir, se ha elegido tramos que incluyen una representación variada de los mesohábitats más abundantes presentes en el río.

En el sistema Quiebrajano-Víboras se decidió llevar a cabo el estudio y la propuesta de un régimen de caudales ecológicos en tres tramos pertenecientes a los cursos fluviales asociados a la cabecera del río Víboras (río Grande), los cañones de Mingo (río Frío) (**Fig. 4**) y el Nacimiento del río San Juan, en localizaciones aguas abajo de la obra o diseño que aprovecha sus aguas, y que, por lo tanto, van a sufrir la afección de los caudales detraídos. En el Trevéz se ha establecido 7 estaciones de trabajo repartidas a lo largo de la cuenca del río (**Fig. 5**), desde el primer careo importante que detrae agua a la cuenca, la acequia Cástaras unos 2 km aguas arriba de la localidad de Trevéz, hasta las proximidades de Mecina Fondales.



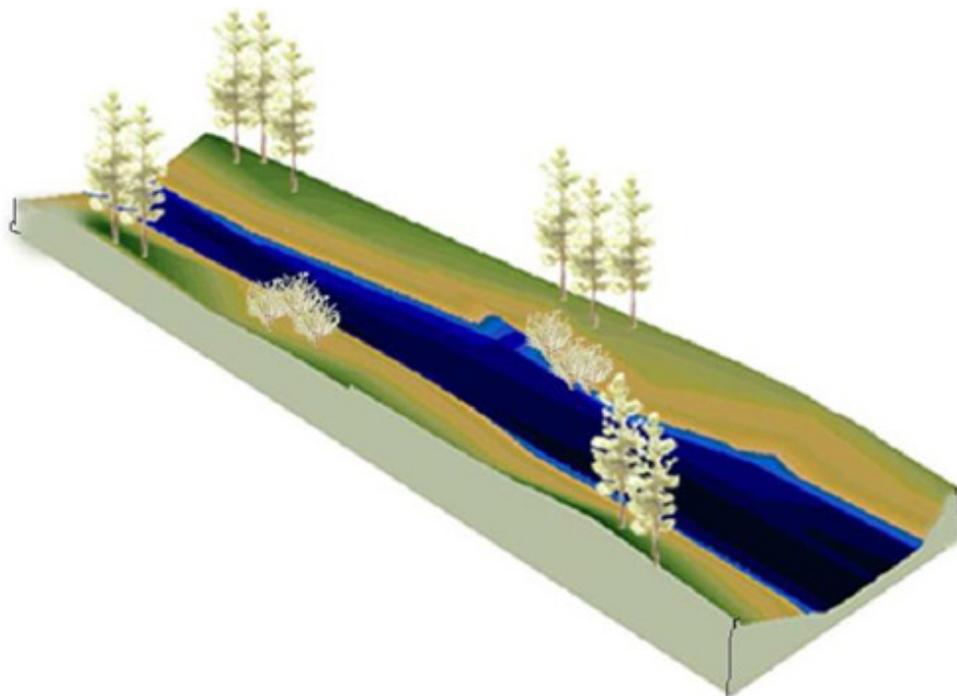
**Figura 4.** Cañones del Mingo.



**Figura 5.** Tramo estudiado del río Trevéz, y vista de la localidad de Trevéz

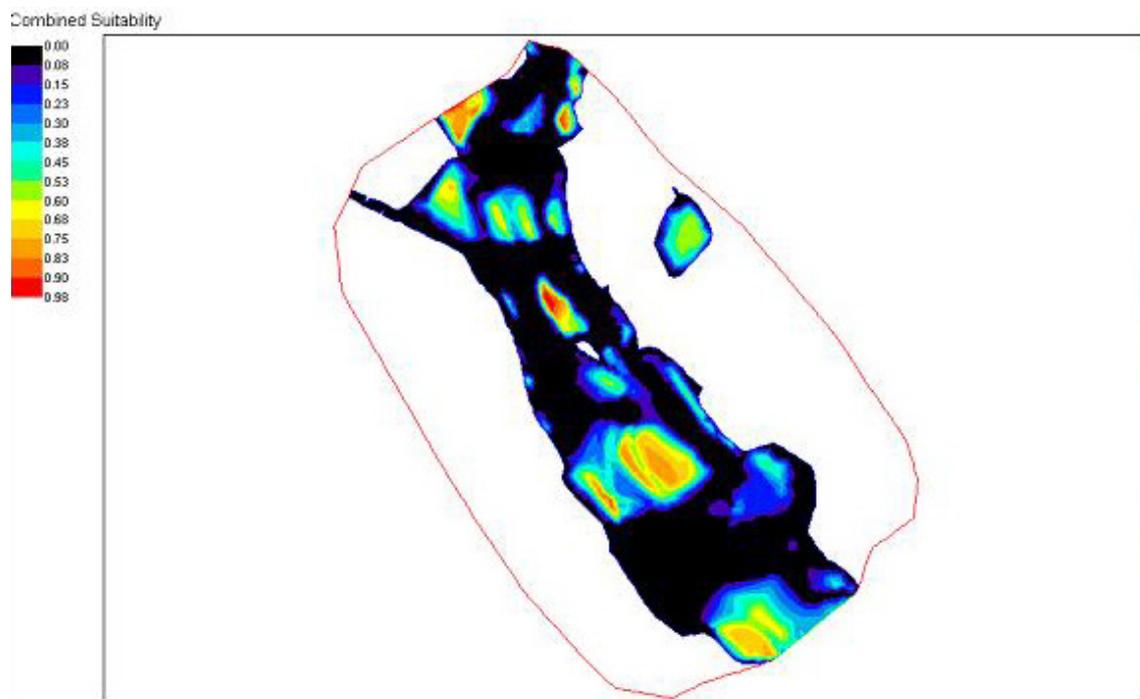
Para poder realizar la simulación hidráulica, las tareas concretas en campo que deben realizarse son: topografía del perfil longitudinal, secciones transversales y determinación del caudal circulante. El trabajo continúa con la introducción de los

datos de campo en los programas, lo que nos permite obtener resultados de variables del hábitat (velocidad, profundidad, tipo de sustrato), cuando cambia el caudal (**Fig. 6**).



**Figura 6.** Modelo del tramo del río San Juan a partir de la simulación con un caudal de referencia utilizado en el trabajo.

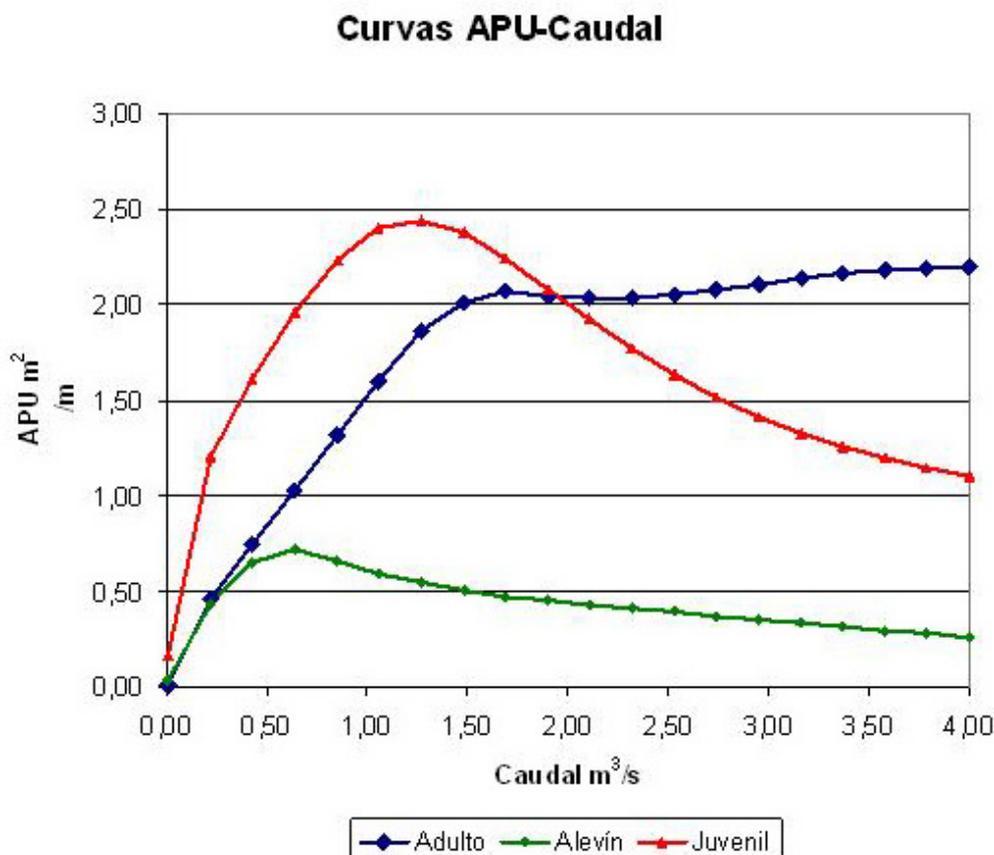
En el río Trevélez se ha utilizado un programa que simula en dos dimensiones (River-2D), con esto conseguimos una imagen en planta de la habitabilidad de cada tramo con cada caudal simulado, como se aprecia en la **Figura 7**.



**Figura 7.** Resultados de la simulación realizada en uno de los tramos estudiados del río Trevélez. Los tonos más rojizos muestran las zonas del río donde se encuentran los hábitats preferibles por las poblaciones piscícolas.

Disponemos de curvas de preferencia de la fauna acuática. En este caso concreto, se contó con las de la trucha, al ser la especie más representativa, de mayores demandas de agua, y más apreciada, y que se encuentra tanto en los cursos de la provincia de Jaén, como en el Trevélez. Estas curvas son modelos que nos permiten conocer las preferencias de las especies piscícolas en términos hidráulicos. Finalmente se obtienen unas curvas que integran el conjunto, las preferencias de hábitat de los peces, y cómo este hábitat sufre cambios con los incrementos de caudal. Así obtenemos las denominadas curvas APU-caudal (Curvas Área Potencial Útil vs. Caudal Circulante).

Sobre estas curvas (**Fig. 8**) se puede elegir el caudal óptimo, o el caudal mínimo, que permite tener una cantidad de hábitat que consideramos aceptable para ese río y, para la supervivencia de esa especie.



**Figura 8.** Relación APU-caudal para tres estados de desarrollo de la trucha común en el tramo correspondiente a los cañones de Mingo.

Una vez obtenidos los datos de caudales ecológicos, para cumplir el segundo objetivo se incorporaron éstos, al programa de gestión de la cuenca. Para ello se necesita una evaluación de recursos y demandas, en el caso de las cuencas de Quiebrajano y Víboras ha sido necesario obtener datos de:

- La restitución de las aportaciones en régimen natural.
- Análisis de las demandas, usos y consumos de recursos hídricos
- Caracterización de las infraestructuras hidráulicas existentes,
- Modelos hidrogeológicos de descarga en régimen natural de los Acuíferos.

Gran parte de ellos existían de proyectos anteriores (IGME-Junta de Andalucía, 2004). En el caso de la cuenca del Trevélez, aún falta parte de esta información, entre ella el análisis de demandas y la descarga de los acuíferos.

En las cuencas de la comarca del sur de Jaén, donde hay más información disponible, los datos se integraron en un modelo para la simulación de la gestión conjunta basado en el código SIMGES, aplicación desarrollada por la Universidad Politécnica de Valencia que se incluye en el paquete AQUATOOL. Este programa permite combinar datos de aportaciones de aguas superficiales y subterráneas, con datos de demandas para ofrecer resultados sobre la alternativa de gestión óptima para la satisfacción de las demandas. En la simulación se analizaron varias alternativas,

como la aplicación conjunta, las obras acometidas en el embalse del Quiebrajano, la impermeabilización del mismo y la conexión entre los dos sistemas. Finalmente se obtuvieron unos niveles de garantía de cumplimiento de las demandas, incluyendo los caudales ambientales, para cada escenario.

## Resultados

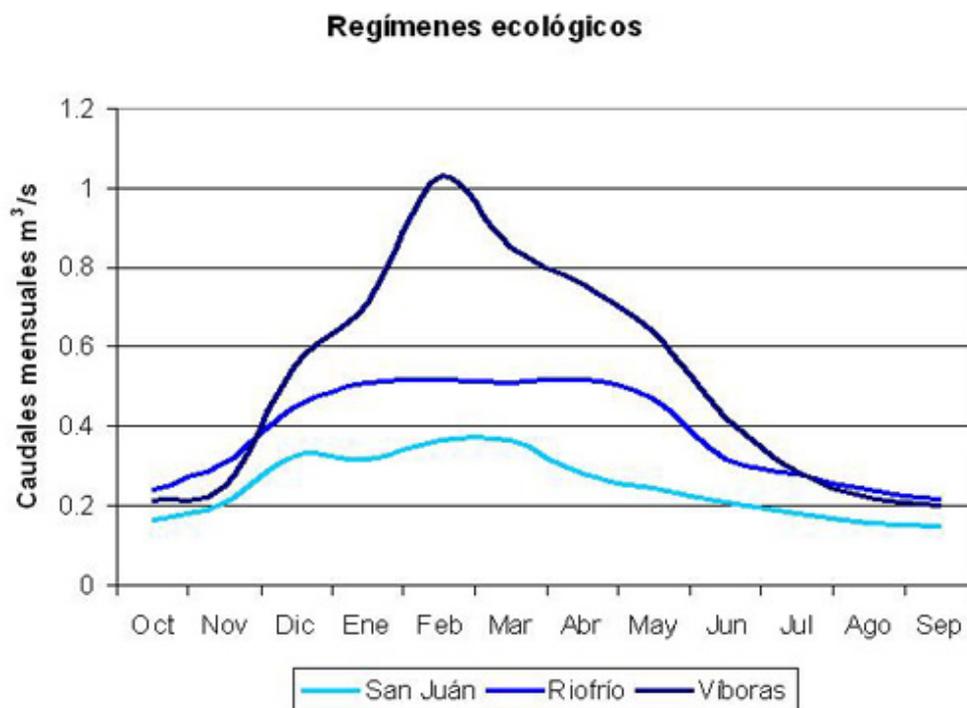
A partir de los caudales ecológicos mínimos calculados en los dos casos, obtenido por el método IFIM, se diseñó un régimen mensual. Éste debe de seguir las pautas del régimen mensual natural de caudales del río. Para ello se parte del caudal ecológico mínimo que debe implementarse el mes más seco del año y, a partir de éste, en el resto de meses se incrementa el caudal mensual propuesto para cada mes incrementando el valor mínimo proporcionalmente a los aumentos naturales de los caudales medios mensuales, que han existido en el río cuando no había alteraciones hidrológicas significativas. Finalmente se trata de ver que implicaciones van a tener la implementación de estos caudales en los sistemas de gestión del recurso hídrico sobre los que estamos trabajando.

### El régimen ecológico de caudales en el sistema Quiebrajano-Víboras

Los caudales ecológicos mínimos obtenidos en los tres tramos estudiados son los siguientes:

- Cañones del Mingo-río Frío: 0,22 m<sup>3</sup>/s.
- Nacimiento río San Juan: 0,12 m<sup>3</sup>/s.
- Alto Víboras: 0,27 m<sup>3</sup>/s

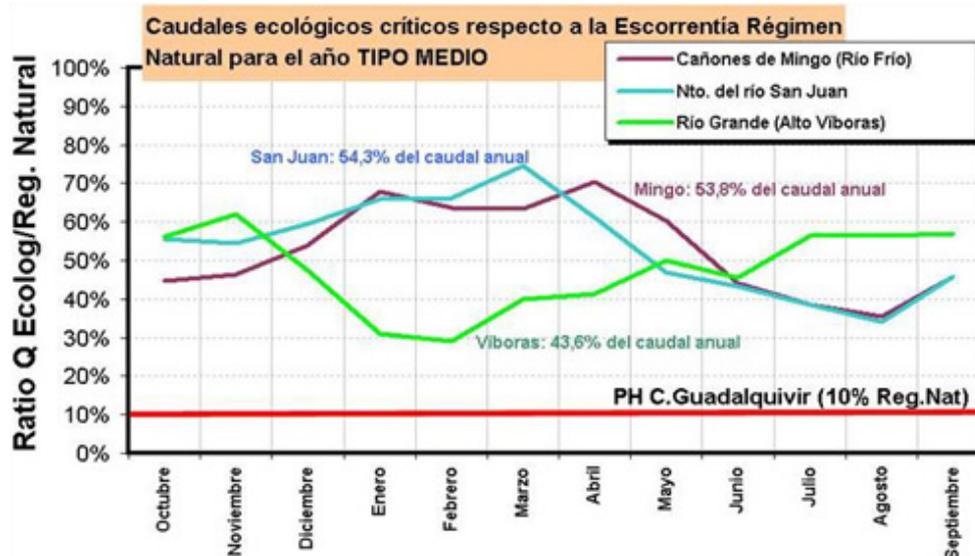
Los regímenes ambientales para estos tres ríos se encuentran en la **Figura 9**.



**Figura 9.** Régimen ambiental de caudales en los ríos Frío, Víboras y San Juan.

Una vez fijado el régimen ambiental de caudales en los cursos fluviales de interés ambiental en estas localidades del sur de Jaén, se incorporaron estos datos, al balance total de la cuenca. Con esto podemos obtener lo que representa la demanda ambiental, con respecto al resto de demandas. De esta forma se obtuvo que:

- La demanda ecológica es de 30,79 hm<sup>3</sup>/año, lo que supone un 43,3% de la demanda total del Sistema Quiebrajano-Víboras, que asciende a un promedio anual de 71,08 hm<sup>3</sup>.
- Comparando esta demanda con los volúmenes totales de caudales naturales circulantes, el 49,1% del caudal correspondería con el régimen ambiental de caudales (**Fig. 10**).



**Figura 10.** Relación de los caudales ecológicos propuestos en los tramos estudiados en porcentaje con respecto al caudal natural. La línea roja señala el 10 % del caudal mensual, una cifra que a pesar de no basarse en ningún criterio científico, aún se propone en muchos planes de cuenca como medida de cálculo para la demanda de caudal ecológico.

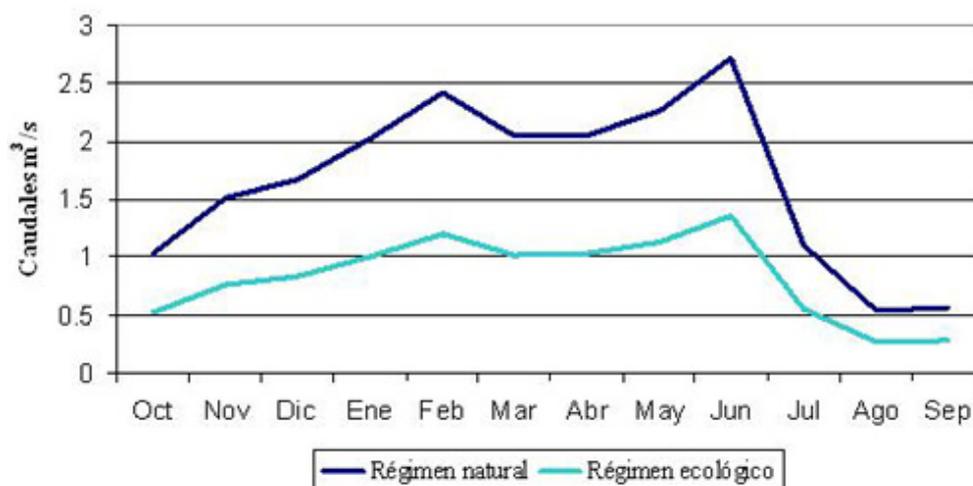
Con estos valores se realizaron varias simulaciones con diferentes esquemas de utilización conjunta (acuíferos y embalses), analizando en cada escenario las garantías para poder satisfacer el abastecimiento urbano, los regadíos y el caudal ecológico. En cualquiera de los escenarios trabajados se podía garantizar mantener el caudal ecológico en los ríos con una probabilidad superior al 92%.

#### El régimen ecológico de caudales en la cuenca del Trevélez

A lo largo de la cuenca se establecieron 7 estaciones; el emplazamiento se decidió gracias al conocimiento de la fauna piscícola de este río. Los trabajos realizados anteriormente por la Escuela de Montes de Madrid muestran que la comunidad piscícola en la cabecera del Trevélez está constituida exclusivamente de trucha común. También se pretendió detectar la respuesta del sistema en varios puntos conflictivos, como podían ser derivaciones y acequias, o zonas de vertidos. Se comprobó la habitabilidad de cada tramo para diferentes estados de desarrollo de los peces. Los caudales mínimos obtenidos en las diferentes estaciones se encuentran en un orden de magnitud que va desde los 0,2 m<sup>3</sup>/s de los tramos de cabecera a los 0,5 m<sup>3</sup>/s en los que se encuentran a menor altitud. Se ha observado que en las estaciones más bajas, con fuertes pendientes, disminuye mucho la habitabilidad con caudales superiores a 0,35 m<sup>3</sup>/s, seguramente producido por el incremento de las velocidades, lo que hace de estos tramos poco aptos para la vida de las truchas y seguramente sólo los empleen para sus migraciones, o en los momentos del año de menor caudal.

También en esta cuenca se intentó buscar zonas aptas como frezaderos. Con respecto a los condicionantes que impone el caudal para esta función, se encontró que sólo uno de los tramos era apto para esta función y se obtenía las mejores condiciones con un caudal de 0,2 m<sup>3</sup>/s. La implementación de estos caudales ambientales supone aproximadamente un 30% del régimen natural de caudales de este río. En la **Figura 11** se observa el régimen de caudales propuesto para el tramo más exigente en caudal, con respecto a los valores medios mensuales medidos en la única estación de aforos de la cuenca situada aguas debajo de la zona de trabajo, próxima a la desembocadura del río en el Guadalfeo.

### Régimen ecológico de caudales



**Figura 11. Régimen ambiental de caudales mínimo propuesto en el río Trevélez, en la grafica se incluye el régimen natural de caudales para poder comparar sus magnitudes.**

## Conclusiones y recomendaciones para la implementación del régimen ecológico de caudales

En muchos sistemas de explotación se llega a conclusiones desacertadas, al afirmar que el mantenimiento de unos caudales ambientales en los ríos es muy complicado. Se justifica esta afirmación desde los responsables de planificación en los intensos aumentos de la demanda que se están produciendo en muchas regiones españolas. Puesto que los requerimientos ambientales son olvidados, son muy frecuentes las situaciones, en las que durante el estiaje las demandas aumentan y no se deja circular por nuestros cursos fluviales un caudal mínimo ambiental que discurra por ellos. En muchas ocasiones se llega a esta situación porque se ha desestimado la reserva subterránea u otras alternativas a la gestión, no sólo en cuanto a su volumen sino también en cuanto a la plasticidad de su utilización.

Como se ha visto, sería posible la implementación de los caudales ambientales, en la planificación del sistema Quebrajano-Víboras, a partir de las mejoras que se esperan obtener de las estrategias de implantación de esquemas de uso conjunto. En las situaciones de incompatibilidades entre las demandas y el régimen ambiental las aguas subterráneas aportan la solución para satisfacer los requerimientos eficazmente.

La posibilidad de almacenar aguas en los acuíferos durante los momentos de recarga o la recarga artificial de los mismos, y la flexibilidad para utilizar esta agua (que fluye a unas velocidades comparativamente mucho más bajas que las superficiales), en los lugares o momentos del año en los que los usos están descompensados con respecto a las reservas superficiales, posibilita mantener unos caudales ambientales en tramos de ríos, que de otra forma se verían sobreexplotados, muy afectados o secos. Esta iniciativa, que consideramos muy positiva llevada a cabo por la Junta de Andalucía y el ITME, está en el momento actual llevándose a otras cuencas, como por ejemplo la del alto Genil (Trabajo en elaboración encargado por IGME, 2007).

Aunque en el segundo caso estudiado, la cuenca del Trevélez, no se tiene aún el conocimiento completo de recursos y demandas, la tendencia es ir encaminados al mantenimiento de usos tradicionales y conservación de los ecosistemas fluviales con sistemas de gestión flexibles. Atendiendo a las necesidades hídricas del ecosistema para mantener su estructura y funcionamiento, se han realizado una serie de recomendaciones, que deberían de ser implementadas para satisfacer las demandas ambientales. En este momento, y concluida esta primera parte del trabajo, se deberá estudiar la posibilidad de asumir estas demandas ambientales dentro del conjunto de demandas que tiene la cuenca, y si es posible, mantener el sistema de riego y recarga del acuífero, aparentemente tan importantes en el mantenimiento de la diversidad vegetal características de las Alpujarras. Debería conseguirse, al igual que en el otro sistema, que con estos condicionantes, se pudieran satisfacer las demandas actuales y futuras, aplicando los modernos sistemas de gestión integrada a la cuenca del Trevélez.

En este caso, parece ser que la solución no va a pasar por la utilización del acuífero como fuente adicional de recursos, dada la baja aportación que cabe esperarse del mismo, además en este caso el reto es mayor pues existe una gran presión para que los usos tradicionales, y el sistema de riego se mantenga funcionando tal y como se hace ahora. Sin embargo como se ha comprobado, las derivaciones que se hacen para las acequias de riego aguas arriba del pueblo de Trevélez, junto a las demandas domésticas ocasionan que el río se seque en varios tramos, algo inadmisibles, ya que de mantenerse esta situación el ecosistema fluvial se verá seriamente afectado. En esta cuenca, la solución futura tendrá que considerar la restricción que supone el régimen ambiental de caudales en el río, y a partir de ésta, realizar la planificación del sistema de gestión de los recursos hídricos de la comarca de las Alpujarras, para lo que se debe tener un conocimiento más detallado de los recursos y de las demandas. Es probable que en esta cuenca, puesto que se encuentra dentro de un espacio protegido, se ha preferido adelantar el conocimiento sobre las necesidades hídricas del ecosistema, para condicionar a partir de ahí el futuro de explotación de la cuenca.

Estos trabajos abren el camino hacia nuevos proyectos, que complementen los resultados obtenidos hasta el momento en las cuencas del Quiebrajano y Víboras. Será necesario conocer las demandas ambientales de los tramos afectados por la regulación superficial, es decir, aguas abajo de las presas, para comprobar si también en esas zonas es posible garantizar el suministro y mantener el régimen ambiental. En el Trevélez como ha quedado dicho falta por integrar los conocimientos ambientales en la gestión integral de la cuenca. Estas primeras experiencias, en las que se incluye el enfoque conjunto de los recursos subterráneos y superficiales, pueden servir de modelo para actuaciones futuras en otras cuencas, en las que se puedan analizar otras alternativas para cubrir las demandas y, que los nuevos sistemas de gestión establecidos cumplan con criterios de eficacia y ahorro junto a la introducción de criterios ambientales. Esto posibilitará una mayor sostenibilidad ecológica, social y económica en la gestión de los ecosistemas hídricos, lo que simplemente significa avanzar hacia el cumplimiento de los objetivos que emanan de la recientemente implementada Directiva Marco del Agua.

## Referencias

- Baeza Sanz, D., García de Jalón, D., Alonso, C., Marchamalo, M., Gortazar, J. y Vizcaino, P. 2006. *Breve historia de la aportación a la determinación de caudales ecológicos desde la Escuela de Montes de Madrid*. XIII Congreso de la Asociación Española de Limnología Barcelona, Julio 2006.
- Ben Sbih, y Pulido. Bosh. A. 1996. *Papel de los careos en la gestión de las aguas de la Alpujarra*. 1ª conferencia Internacional Sierra Nevada.
- Bovee, K.D. 1982. *A guide to Stream Habitat analysis using the Instream Flow Incremental Methodology*. Instr. Flow Inf. Paper 12. USDI Fish and Wildl. Serv. Washington.
- Consejería de Medio Ambiente. 2004. *Plan de Desarrollo Sostenible del Parque Natural de Sierra Nevada*.
- Esteban, A., Prat, N. 2006. *Alternativas para la gestión del agua en Cataluña. Una visión desde la perspectiva de la nueva cultura del agua*. Bakeaz, Fundación Nueva Cultura del Agua. 213 pags.
- Fornés, J.M., A. De la Hera and M.R. Llamas. 2005. The silent revolution in groundwater intensive use and its influence in . *Water Policy* 1-16
- García de Jalón, D. 1990. Técnicas hidrobiológicas para la fijación de caudales ecológicos mínimos. En: *Libro homenaje al Profesor D.M. García de Viedma*. 183-196. A. Ramos, A. Notario & R. Baragaño (eds). FUCOVASA. UPM. Madrid.
- García de Jalón, D. 2003. The Spanish Experience in Determining Minimum Flow Regimes in Regulated Stream. *Canadian Water Resources Journal* 28: 185-198.
- IGME-Junta de Andalucía, 2004. *Utilización conjunta para abastecimiento. Urbano de los recursos superficiales y Subterráneos de los acuíferos relacionados con el abastecimiento del Conjunto Quiebrajano-Víboras*. 316 pags.
- Jowett, I.G. 1998. Hydraulic geometry of New Zealand rivers and its use as a preliminary method of habitat assessment. *Regulated Rivers: Research and Management* 14: 45-466.
- Palau, A. 1994. Los mal llamados caudales "ecológicos". Bases para una propuesta de cálculo. *OP (Obras Públicas)*, vol 28 (Ríos II): 84-95.

Polo, M.J., C. Vega y M.A. Losada. 2006. Gestión integral de la Cuenca del Guadalfeo. Revista Medio Ambiente Junta de Andalucía. Nº 54

Stalnaker, C.B. 1994. "Evaluation of instream flow habitat modelling", in Petts, G.E. and Calow, P. (Eds.), *The River Handbook Volume 2. Hydrological and Ecological Principles*, Blackwell Scientific Publications, London .

Steffler, P., Waddle, T., Ghanem, A., Katopodis, C. y Locke, A. 2000. Comparison of one and two-dimensional open channel flow models for a small habitat stream. *Rivers* 7: 205-220