

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

GES-Q: SISTEMA INNOVADOR DE APOYO A LAS DECISIONES PARA LA GESTIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA EN TIEMPO REAL Y LA PLANIFICACIÓN DE LAS CUENCAS

D. Ángel Ferrer Díaz - Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

RESUMEN: FERMAC, consciente del vacío de tecnología integral del ciclo del agua desarrolla la plataforma GES-Q incluyendo en la gestión previsiones de precipitación, almacenamiento recurso, circulación de caudales por ríos y ordenación. No es posible avanzar eficazmente en la gestión del agua partiendo de etapas intermedias, conociendo que el 30% del ahorro del recurso se produce en la gestión eficiente en etapas iniciales del ciclo del agua. El mercado cuenta con grandes avances en cuanto a previsiones meteorológicas, previsiones de consumos y gestión interna eficiente de cada consumo, pero no cuenta con la tecnología de unión que los integre. GES-Q se basa en la "teoría del tránsito inverso de ondas". El algoritmo que utiliza la plataforma para gestionar el tránsito de ondas de circulación para cada tramo de río. Conocido el algoritmo de circulación es posible la gestión integral. Partiendo de las previsiones meteorológicas y de consumos es capaz sin iteraciones de gestionar cada tramo de río, suministrando desde el punto de aportación de cabecera de cada sistema el caudal necesario variable en el tiempo para asegurar los consumos, los condicionantes de cada tramo (hidráulicos, medioambientales) y a la vez ahorrar una media del 30% del recurso.

1. INTRODUCCIÓN

En el año 2011 se plantea por parte de la Confederación Hidrográfica del Tajo la necesidad de optimizar la gestión de la distribución en el canal princi-

pal de la Real Acequia del Jarama por existir problemas derivados del deficiente estado de las infraestructuras, sin modernización, con riegos por gravedad, con un desajuste entre la demanda y la capacidad del canal, así como la necesidad de no realizar inversiones de alto coste.

Con estas premisas se planteó el estudio de un nuevo sistema de distribución que no requiriera de fuertes inversiones y a su vez permitiese administrar el canal con criterios hidráulicos y consiguiendo un reparto igualitario de las demandas. Después de tres años de investigación se logró definir matemáticamente y controlar el *tránsito inverso de ondas* permitiendo cálculos explícitos. Una vez definido el sistema de forma matemática, se desarrolló un modelo prototipo denominado RECA que permite gestionar canales en tiempo real que se aplicó y se sigue aplicando con excelentes resultados contrastados en diversos canales de riego.

*Los riegos suponen un consumo de más del 40% de los recursos hídricos, por lo que **RECA** supone un gran avance frente a la adaptación al cambio climático. Su ahorro del orden del 20% supone un complemento muy eficaz de **GES-Q**.*

2. DESAFIO Y SOLUCIÓN

Actualmente los gestores del agua se enfrentan al reto de satisfacer las crecientes demandas de agua mientras mantienen la sostenibilidad ambiental en un contexto de cambio climático, aumentando la escasez de agua y la alta probabilidad de eventos extremos (sequías e inundaciones), por ello una de las principales preocupaciones de todos los actores de la gestión del agua es la creciente necesidad de ahorrar recursos hídricos. El desafío actual consiste en optimizar el recurso hidráulico a la vez que se cumple con todos los condicionantes impuestos para cada tramo de río (hidráulicos y medioambientales). La única solución útil pasa por definir en cada momento la previsión óptima, comprobando y corrigiendo en tiempo real. Es necesaria una gestión integral que aúne en una misma plataforma las demandas, las previsiones meteorológicas, las prioridades de usos del agua, las políticas, los condicionantes de cada tramo (hidráulicos, ecológicos y sociales) y la gestión hidráulica.

A todo lo expuesto, hay que añadir que la gran sequía que afectó a España desde 2016 hasta los primeros meses de 2017, pone aún más de relieve la necesidad del control y optimización de los recursos. Por todo lo anterior, dada la bondad de la metodología del tránsito inverso de ondas, que aporta excelentes resultados teóricos - prácticos, se decidió plantear el mismo sistema para la regulación de cauces naturales, que aunque difieren sustancialmente en su geometría con los canales, son una sección hidráulica por la que circula el agua. Los primeros ensayos teóricos pusieron de manifiesto que, aunque el transporte de ondas difiere de canales a ríos, no dejan de comportarse de igual manera frente a la aplicación del tránsito inverso de ondas. Estos resultados satisfactorios se han desarrollado en el Proyecto Ges-Q para el Control y Gestión de Cuencas Hidrográficas financiado por el CDTI.

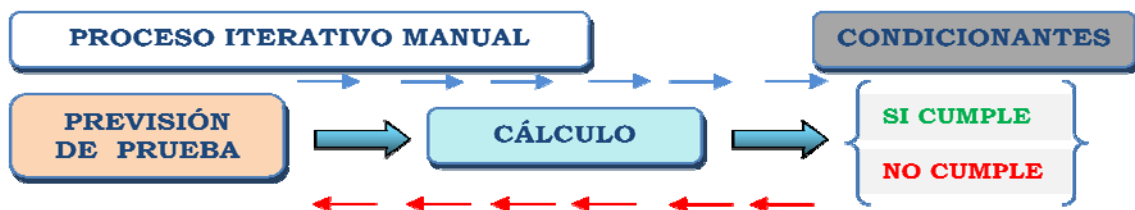
3. ESTADO DEL ARTE

En la actualidad, para definir los caudales variables en el tiempo que deben ser evacuados desde cabecera de un sistema hidráulico, se utilizan software hidráulicos que existen en el mercado capaces de modelizar el flujo en régimen variable (HEC.RAS-SWMM-MIKE 11-IBER, etc) siendo la dificultad básica de todos ellos que necesitan en cada cálculo tener definidos todos los condicionantes; (entradas y salidas aguas abajo) así como los datos en cabecera para obtener los parámetros hidráulicos resultantes; (velocidades, calados, etc). Dada la incertidumbre a la hora de introducir unos datos de partida "veraces" no se asegura que el "hidrograma prueba-error" de previsión en cabecera sea el óptimo, no ajustándose la oferta a la demanda en todos los puntos del sistema a abastecer y no cumpliendo satisfactoriamente los condicionantes del tramo, tanto los hidráulicos como los medioambientales. Los modelos actuales por tanto, no son suficientemente útiles para definir adecuadamente los caudales óptimos en cabecera, por seguir un camino de cálculo desde aguas arriba - hacia aguas abajo de un sistema.

A) MODELOS CON SOFTWARE DE MERCADO

Se realizan múltiples cálculos hasta aproximarse a una previsión que satisfaga lo mejor posible los condicionantes (no alcanzándose el óptimo).

Figura 1. Proceso de los modelos con software de mercado



Consecuencias de este método A con software de mercado.

- Imposibilidad de cumplir todos los condicionantes satisfactoriamente.
- Proceso muy largo, costoso y sin garantías.
- No permite correcciones en tiempo real.
- Necesita personal muy cualificado con alta experiencia.
- Bajo rendimiento y altos costes.

>>> ***Esta metodología de alto coste resulta NO satisfactoria.*** <<<

B) SOFTWARE ESTADÍSTICO

A menudo los modelos tradicionales se complementan con software de probabilidad. El proceso toma los resultados (Q-t) de cálculo de una serie de hipótesis, y como resultado obtiene en un momento dado el porcentaje de acierto en el cumplimiento de condicionantes. Nunca tienen en cuenta la hipótesis óptima, ni su resultado se basa en cálculos hidráulicos. Por todo lo anterior,

FERMAC plantea en su método seguir el camino contrario, es decir, desde aguas abajo – hacia aguas arriba y para ello se requiere el conocimiento del tránsito real de las ondas del agua.

4. TEORÍA DEL TRÁNSITO INVERSO DE ONDAS

La técnica aplicada para el desarrollo de esta teoría está registrada por **FERMAC Ingenieros Consultores SLP**, y se basa en la definición y conocimiento del comportamiento en el transporte de las ondas de flujo originadas en cabecera (aguas arriba) a lo largo de una sección hidráulica y las deformaciones que sufre en su tránsito. Una vez definida la función de distribución de las ondas, que depende de múltiples factores como son: velocidad lineal, velocidad transversal, cantidad de movimiento, deformación, ciclos de histéresis, efectos rotacionales, etc se establece el algoritmo que permite prever espacial y temporalmente en cada punto la onda de llegada.

Este hecho determinante, nos permite definir en cabecera cuál ha de ser la onda original a producir para alcanzar en un punto determinado las condiciones de nivel y caudal necesarias que permitan cumplir los condicionantes exigidos.

Es evidente que cada canal y cada río tienen comportamientos totalmente diferentes por lo que es necesario definir éstas funciones de forma individualizada. También es importante reseñar que por no estar ante sistemas hidráulicos cerrados, las funciones de distribución no son fijas y se rigen por un algoritmo de variación temporal que da lugar a un modelo matemático complejo que depende de múltiples factores como son: condiciones iniciales, variación de rugosidades, ciclos de histéresis, deformaciones, etc.

Figura 2. Proceso con el **método del tránsito inverso de ondas**



Se realiza un único cálculo y se obtiene de forma directa la previsión óptima.

Consecuencias de este método mediante el tránsito inverso de ondas.

- TOI (Tránsito de onda inversa) elimina las iteraciones.
- Alcanza el óptimo de manera directa.
- Asegura correcciones en tiempo real (cada 15 minutos).
- Personal sin necesidad de alta experiencia.
- Óptimo rendimiento y bajo coste.
- Tiempo de ejecución = 15 min (posibilidad de previsión semanal).

5. SISTEMA RECA

La aplicación de la *metodología del tránsito inverso de ondas* ha permitido el desarrollo de un sistema de gestión y regulación de canales para el riego denominado RECA. El modelo se basa en un concepto simple: "**Dar el agua que se necesita cuando se necesita y con el nivel adecuado**", es decir:

>>>> AJUSTA LA OFERTA A LA DEMANDA EN TIEMPO REAL <<<<

Está implantado en las zonas regables del Canal de las Aves y la Acequia Real del Tajo (Aranjuez) todos ellos pertenecientes a la demarcación de la CHTajo y con unas 7000 Has de riego. Los resultados prácticos obtenidos han sido buenos, cumpliendo las concesiones y proporcionando a los usuarios un sistema de riego en cuasi-demanda. Un vídeo sencillo explicativo está disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=KHcJHt7tTqk>

En la ponencia titulada "*Gestión Integral y optimizada para la explotación de canales*" realizada por la Confederación Hidrográfica del Tajo y FERMAC en la Jornada Técnica organizada por SPANCOLD "*Gestión en grandes infraestructuras para riego*" del día 9 de marzo de 2016, se expusieron los resultados obtenidos en las zonas donde está implantado RECA en la CHTajo: https://www.spancold.es/Archivos/JT Infraestructuras Riego 20160309 08_Angel Ferrer.pdf

De las conclusiones de los test realizados por la CHTajo en las zonas de implantación del modelo RECA se puede reseñar que, el ahorro del recurso con respecto al consumo medio de los 10 últimos años es del 20% y respecto al año de máximo consumo, es el 32%. Hay que sumar el ahorro energético por reducirse y optimizarse la utilización de una estación de bombeo, con una disminución del consumo eléctrico del 26% con respecto a la media del gasto de los 10 últimos años y del 40% con respecto al año de mayor gasto. Mediante RECA se asegura que no hay en ningún momento desbordamientos ni carencias de agua, por lo que no se producen roturas de las instalaciones, no sufriendo cortes de suministro y por tanto un ahorro económico para los gestores. La CHTajo ha valorado el ahorro producido en ejecución de obras de reparación con respecto a los 10 años anteriores en un 95%.

6. SISTEMA GES-Q

Como solución a las necesidades de los gestores de cuencas se decidió plantear la teoría del tránsito inverso de ondas a sistemas abiertos en lámina libre en cauces naturales. Los primeros ensayos teóricos del Proyecto GES-Q pusieron de manifiesto la fiabilidad del método para el control de los ríos y la Gestión de sistemas de explotación de Cuencas Hidrográficas.

Para aplicar el *método* es necesaria la modelización hidráulica del río y para ello se dispone del "motor" del SWMM5 de la EPA que es abierto mediante una

DLL. Los puntos de control pueden estar cada 15-20 Km así como en los puntos donde existan en la actualidad elementos de control (SAIH). Una vez modelizado el tramo de río, se realiza el proceso de calibración del modelo GES-Q realizando las pruebas necesarias. Se obtienen así unas funciones dinámicas de distribución de ondas y su comportamiento en el tránsito físico y temporal por el cauce. En el sistema se integran dos componentes, que en conjunto lo convierten en un DSS:

- 1) *Software de simulación hidrológica-hidráulica*: basado en el Tránsito inverso de ondas
- 2) *Red de monitoreo*: en puntos de control para comprobar el funcionamiento en tiempo real.

Figura 3. Operación de la gestión T_{real} con el Sistema GES-Q



Enlace video: <https://youtu.be/nMIKlnzxKdg>

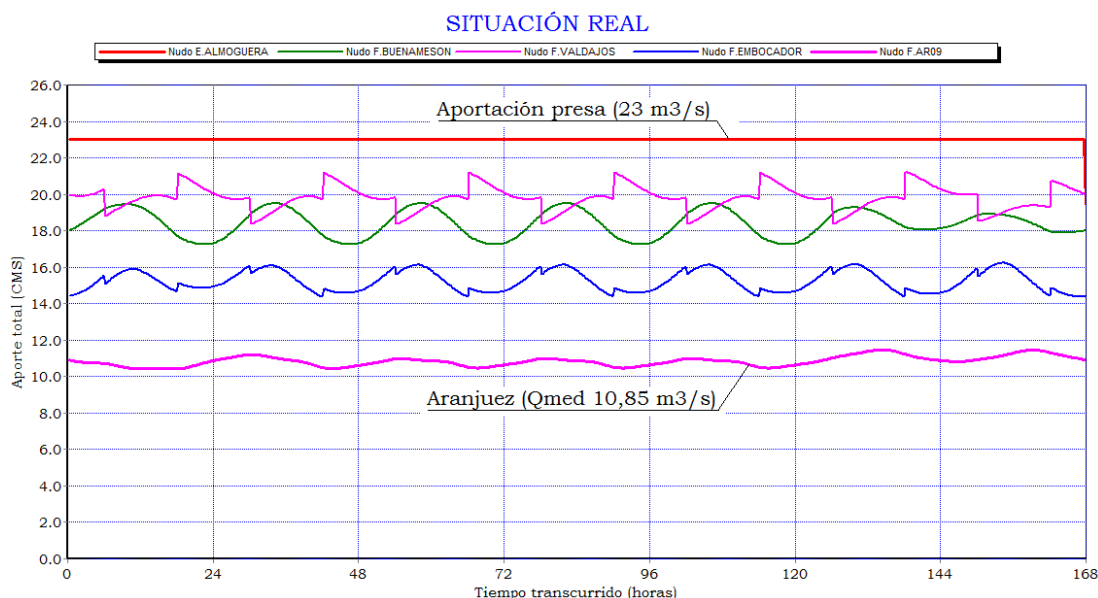
6.1. Cuenca piloto. Caso práctico.

Se ha estudiado el tramo de 117 Km en la cabecera del Tajo entre Bolarque (Almoguera) – Aranjuez y se muestran dos gráficos comparativos de las calibraciones realizadas. La figura 4 ofrece los resultados de caudal obtenidos en los puntos de control con el funcionamiento real en la 4ª semana de junio de 2017, siendo el caudal medio de aportación (rojo) desde la presa de 23 m³/s, resultando un volumen de 13,91 Hm³/semana, mientras que en el punto de control de Aranjuez (magenta) donde el caudal medio diario mínimo debe ser de 6 m³/s (equivale a 3,63 Hm³/semana), se ha registrado un caudal medio diario muy superior de 10,85 m³/s.

Esto supone un exceso de aportación desde la presa del orden del 40% siendo un volumen de recurso que se podría ahorrar y reservar para otros momentos comprometidos o para otros usos, así como permitir una mejora en la regulación interanual de los embalses de cabecera que presentan mínimos continuados desde 1980.

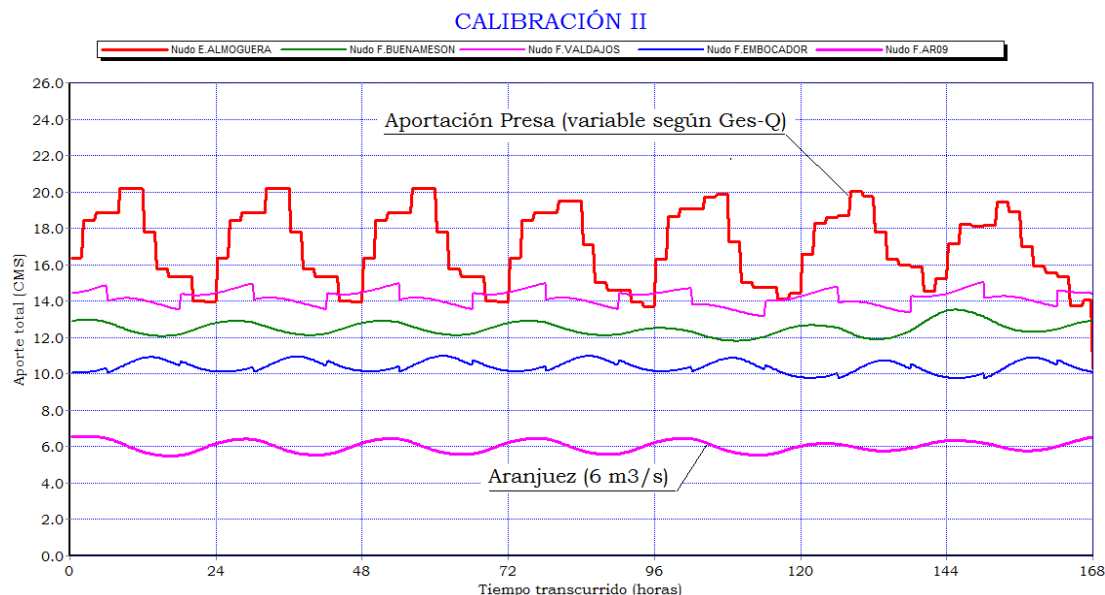
En la *figura 5*, se observan los resultados para la *calibración II*, **con caudal medio en Aranjuez de 6,06 m³/s. Cumpliendo el condicionante ambiental en Aranjuez al 100 %.**

Figura 4. Aportación media desde la presa de 23 m³/s



Volumen semanal aportado por la presa:	13,91 Hm ³
Volumen punto control Aranjuez:	6,56 Hm ³ > 3,63 Hm ³
Exceso en Aranjuez:	2,42 Hm ³ (40%)

Figura 5. Aportación variable según GES-Q desde la presa de Almoguera



Volumen semanal aportado por la presa:	10,98 Hm ³
Cumplimiento en Aranjuez:	3,63 Hm ³ (100%) <<<

A estos excelentes resultados de ahorro hay que añadir los derivados por la gestión de RECA en dos zonas regables (7000 has) de la cuenca piloto, resultando un ahorro total del orden del 30% en este caso práctico, siendo un complemento perfecto de GES-Q.

6.2. Desarrollos complementarios.

Dentro del prototipo del sistema GES-Q, se ha implementado un módulo de previsiones meteorológicas que calcula por métodos hidrológicos los caudales de las cuencas vertientes y de este modo permite gestionar el sistema hidráulico de forma completa. En la figura 7 se muestran los resultados de GES-Q para la calibración II con unas previsiones meteorológicas de lluvias aprovechando la escorrentía producida y ahorrando aún más agua (1 Hm³).

Figura 6. Pantalla general de GES-Q con previsión de lluvias

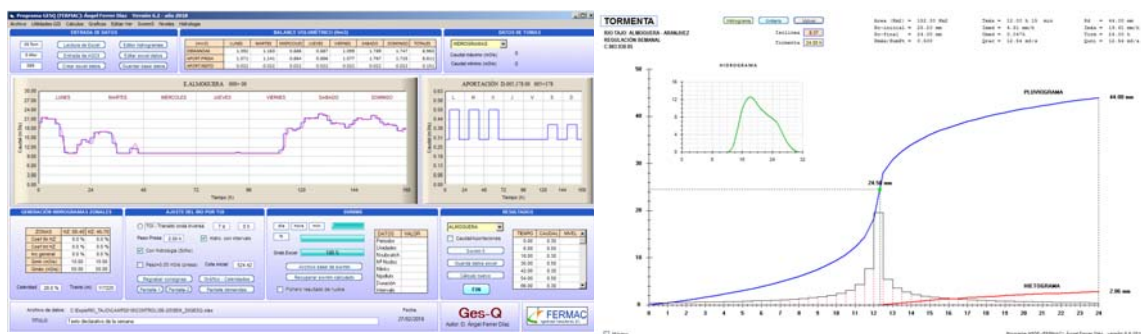
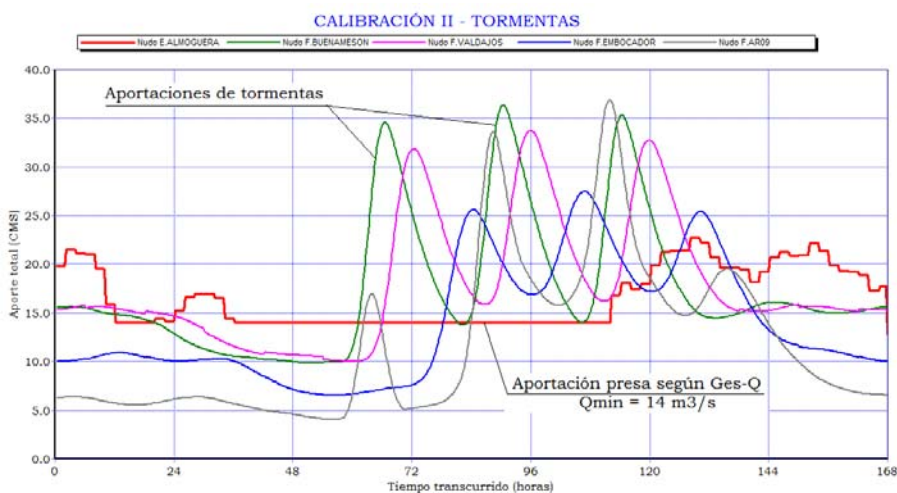


Figura 7-Calibración II con GES-Q 2ª semana julio: con previsiones de lluvia



Volumen aportado:	9,98 Hm ³
Volumen punto control Aranjuez:	7,19 Hm ³
Exceso en Aranjuez:	3,56 Hm ³ (50%)

Se prevé la implementación próximamente de módulos capaces de aprovechar los datos de satélites (humedad) para la estimación de parámetros hidrológicos y su aplicación en tiempo real, así como el módulo **EcoGes** para dar cumplimiento a los condicionantes ambientales según la normativa Reglamento de Dominio Público Hidráulico y la Instrucción de Planificación Hidrológica, apoyándonos en la Red SAICA.

6.3. Objetivos alcanzados y su cuantificación.

En esta primera fase del Proyecto **GES-Q** se han conseguido los siguientes objetivos:

1.- Se mejora el funcionamiento de la gestión del río, consiguiendo mantener **el régimen del río estable** con oscilaciones de caudal entorno a 1,5 m³/s y no de 4,5 m³/s. Esto se ha conseguido haciendo variar el caudal desaguado de la presa adecuadamente mediante la aplicación del tránsito inverso de ondas. La estabilidad de régimen conseguida es del 67%.

2.- Se consigue un notable ahorro de agua. Se ha comprobado que **es posible un ahorro total en una semana de 3 Hm³**, lo que supone un **ahorro del 22%**. Este ahorro es posible gracias a las variaciones de caudal desaguado desde la presa mediante el cálculo de GES-Q aplicando el algoritmo del tránsito inverso de ondas. Resultando el ahorro anual posible cercano a los 90 Hm³.

3.- Se ha implementado con éxito el desarrollo del módulo de cálculo de hidrogramas de previsión meteorológica para el **aprovechamiento de agua teniendo en cuenta las aportaciones por escorrentía directa** en los distintos puntos del tramo así como los retornos. El posible aprovechamiento de retornos resulta del 12%.

7. BENEFICIOS DE GES-Q

7.1. Hidráulicos.

- Correcciones en tiempo real del flujo hidráulico (15 minutos).
- Ajusta la oferta a la demanda con el consiguiente ahorro.
- Previsiones más ajustadas mejorando los planes de actuación.
- Mejor aprovechamiento de las aportaciones por tormentas con una antelación de 3-5 días y la respuesta frente a avenidas extraordinarias.
- Aprovechamiento efectivo de las reservas hidráulicas.
- Complemento eficaz de los sistemas actuales SAIH.
- Mejor regulación interanual de los embalses y su mejora en la capacidad de almacenamiento respondiendo con más garantías ante sequías.
- Optimización de los recursos demandados frente a la capacidad real.
- Control del gasto efectivo en tiempo real.
- Aprovechamiento de las infraestructuras existentes sin un gasto significativo de implantación.

- Cumplir objetivos sociales y económicos.

7.2. Medioambientales.

- Control de los condicionantes ecológicos de calidad y cantidad. Apoyado en la Red SAICA existente y en los Planes Hidrológicos de Cuenca.
- Mejorar las medidas de adaptación a los objetivos medioambientales.

7.3. Frente al Cambio climático.

- Adaptación de los recursos escasos al cambio climático.
- Sistema acorde con el siglo XXI y sus nuevas tecnologías.
- “Abrir el río” a las nuevas tecnologías.
- Adaptación a módulos de captación de datos por satélite.

8. CONCLUSIONES

GES-Q aporta un sistema integral de gestión de cuencas, tecnológicamente puntero, de un bien escaso como es el agua y más aún en los actuales escenarios de cambio climático. Se pretende aunar la gestión de la oferta y la demanda del agua en los usos consuntivos previstos o futuros, con el mantenimiento y mejora ecológica y ambiental de los ríos de acuerdo a la Directiva Marco del Agua.

GES-Q puede ser una herramienta de gran ayuda como Sistema Soporte de Decisión (SSD) para la Planificación y Gestión de Cuencas, así como en las tareas de diseño de los “Planes Especiales de Sequía” y de los “Planes Hidrológicos de las Demarcaciones Hidrográficas”. Los resultados que proporciona sirven de adaptación frente a los impactos del cambio climático por el ahorro del recurso del orden de un 22% en los casos estudiados, así como en las medidas de cumplimiento de objetivos medioambientales, de satisfacción de demandas consuntivas y no consuntivas, y de forma transversal cumplir objetivos sociales y económicos.

*Conjugando en la gestión de la cuenca los sistemas **GES-Q + RECA** se consigue un ahorro medio total de agua del orden del 30% como mínimo.*

FERMAC ha presentado este proyecto “*GES-Q. Innovate Decision Support System for the real time hydrologic-hydraulic management and planning of river basins*” a la convocatoria SME-INSTRUMENT-2020, obteniéndose el sello de excelencia que otorga la Comisión Europea a los mejores desarrollos y ha sido premiado por MINECO para realizar el estudio de expansión europea del producto.