



Canal de
Isabel II

CUADERNOS DE I+D+i

16

Integración de la predicción meteorológica
en los módulos de gestión del sistema de
abastecimiento de Canal de Isabel II,
mediante modelos de aportación diaria



© Canal de Isabel II – 2012

Autores:
Luis García Amor

Dirección del estudio:
Juan Carlos Ibáñez

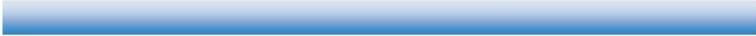
ISSN: 2254-8955
Depósito Legal: M-30191-2012



Esta versión forma parte de la Biblioteca Virtual de la **Comunidad de Madrid** y las condiciones de su distribución y difusión se encuentran amparadas por el marco legal de la misma.



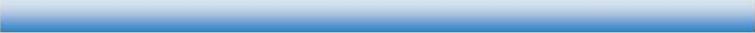
www.madrid.org/publicamadrid



Exclusión de Responsabilidad

Las afirmaciones recogidas en el presente documento reflejan la opinión de los autores y no necesariamente la de Canal de Isabel II.

Tanto Canal de Isabel II como los autores de este documento declinan todo tipo de responsabilidad sobrevenida por cualquier perjuicio que pueda derivarse a cualesquiera instituciones o personas que actúen confiadas en el contenido de este documento, o en las opiniones vertidas por sus autores.



Presentación

Los cuadernos de I+D+i de Canal de Isabel II forman parte de la estrategia de gestión del conocimiento de la empresa y del desarrollo del Plan de Investigación, Desarrollo e Innovación.

Son elemento de difusión de proyectos e iniciativas desarrollados y auspiciados desde Canal de Isabel II para la innovación en las áreas relacionadas con el servicio de agua en el entorno urbano.

Exponen las diferentes problemáticas abordadas en cada proyecto junto con los resultados obtenidos. La intención al difundirlos mediante estas publicaciones es compartir las experiencias y conocimientos adquiridos con todo el sector de servicios de agua, con la comunidad científica y con cuantos desarrollan labores de investigación e innovación. La publicación de estos cuadernos pretende contribuir a la mejora y eficiencia de la gestión del agua y, en consecuencia, a la calidad del servicio prestado a los ciudadanos.

Los Cuadernos de I+D+i ya publicados son los que figuran en la tabla siguiente.

Tabla a. Títulos en la colección de Cuadernos de I+D+i

Nº colección	Cuadernos Investigación, Desarrollo e Innovación publicados
1	Transferencias de derechos de agua entre demandas urbanas y agrarias. El caso de la Comunidad de Madrid
2	Identificación de rachas y tendencias hidrometeorológicas en el ámbito del sistema de Canal de Isabel II
3	Participación de Canal de Isabel II en el Proyecto Internacional de Eficiencia en la Gestión (IDMF)
4	Microcomponentes y factores explicativos del consumo doméstico de agua en la Comunidad de Madrid
5	El agua virtual y la huella hidrológica en la Comunidad de Madrid
6	Estudio de potenciales de ahorro de agua en usos residenciales de interior
7	Investigación sobre potenciales de eficiencia con el empleo de lavavajillas
8	Precisión de la medida de los consumos individuales de agua en la Comunidad de Madrid
9	Proyecto de investigación para la definición y evaluación de la aplicabilidad de un bioensayo para la determinación de la toxicidad del agua utilizando embriones de pez Cebra
10	Eficiencia en el uso del agua en jardinería en la Comunidad de Madrid
11	Técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica para la evaluación de la demanda de agua para usos de exterior en la Comunidad de Madrid
12	Estudio sobre la dinámica de cianotoxinas en dos embalses de abastecimiento de Canal de Isabel II
13	Desarrollo de un sistema de validación, estimación y predicción de consumos horarios por sectores para la red de distribución de Canal de Isabel II
14	Seguimiento de la consolidación del desarrollo urbano en la Comunidad de Madrid mediante técnicas de teledetección
15	Experiencias para la recuperación del fósforo de las aguas residuales en forma de estruvita en Canal de Isabel II

Ficha Técnica

Título del proyecto	Integración de la predicción meteorológica en los módulos de gestión del sistema de abastecimiento de Canal de Isabel II, mediante modelos de aportación diaria.
Línea de investigación	Aseguramiento de la continuidad estratégica del servicio
Unidades implicadas de Canal de Isabel II	Subdirección de I+D+i
Participación externa	ECM, Ecología y Tecnología del Medio Ambiente
Objeto y justificación del proyecto	<p>Establecer un sistema que permita predecir aportaciones a los embalses de Canal de Isabel II con alcance de unos pocos días.</p> <p>Adicionalmente, se pretenden ensayar diversas estrategias de modelización de aportaciones en el nivel diario, en cuencas de embalses de Canal de Isabel II, evaluando su capacidad para predecir aportaciones.</p>
Contribución al estado del arte	<p>Se han planteado y ensayado formulaciones originales para la simulación de aportaciones diarias, como un modelo métrico basado en filtros recursivos para separación del caudal base; o la incorporación de un algoritmo de simulación de nieve al modelo de balance GR4J.</p> <p>Además, se ha definido y ensayado con éxito una técnica de retroalimentación de errores basada en la corrección del estado de humedad simulado, que permite incorporar en un modelo de balance la información sobre datos de caudal del pasado inmediato.</p>
Resumen del desarrollo de proyectos e hitos relevantes	<p>El modelo GR4J, ampliamente probado en Francia, ha sido ensayado con éxito en cuencas de un ámbito geográfico distinto. Se ha completado el modelo con un algoritmo para la simulación de procesos nivales, ausente en la formulación original. Adicionalmente, este modelo se ha utilizado como base para la definición y ensayo de una formulación original de retroalimentación de errores.</p> <p>El proyecto realizado aporta un caso más de comparación entre modelos conceptuales y modelos métricos.</p>
Resumen de resultados obtenidos	<p>Se ha formulado y ensayado con éxito un modelo diario de aportaciones, adecuado a las cuencas de los embalses que gestiona Canal de Isabel II y de suma utilidad para la información hidrometeorológica actualmente disponible.</p> <p>Asimismo, se dispone de una implementación informática en pruebas de un sistema de predicción de aportaciones basado en dicho modelo, para tres cuencas de embalses de Canal de Isabel II. El sistema admite predicciones meteorológicas y retroalimentación con datos de caudales pasados.</p>
Líneas de Investigación abiertas para la continuación de los trabajos	<ul style="list-style-type: none"> – Ampliación de la investigación al resto de las cuencas de embalses gestionadas por Canal de Isabel II. – Incorporación de predicciones meteorológicas probabilísticas, (la versión actual sólo incorpora predicciones deterministas). – Profundización en la investigación sobre sistemas de retroalimentación de caudales en modelos de balance. – Mejora de la simulación de los procesos asociados al manto de nieve, especialmente en la medida en que se pueda disponer de datos de contraste específicos .

Resumen Ejecutivo

El proyecto Integración de la predicción meteorológica en los módulos de gestión del sistema de abastecimiento mediante modelos de aportación diaria que se presenta en este cuaderno de I+D+i es un estudio de carácter experimental cuyo objetivo es evaluar varias estrategias de modelización de aportaciones diarias a los embalses de Canal de Isabel II, seleccionando la que se considere más adecuada y eficaz en sus pronósticos.

Canal de Isabel II realizó trabajos previos en modelización hidrológica. En 1991 se abordó un trabajo de implementación y calibración de modelos de aportaciones con resolución diaria para cada uno de sus embalses que sirviese para la estimación de aportaciones futuras a partir de escenarios meteorológicos hipotéticos para los próximos días y, especialmente, para evaluar las aportaciones esperables por la fusión del manto de nieve. En 1997 se desarrolló la aplicación SYGA sobre un trabajo previo de modelización hidrológica y de funcionamiento de embalses durante las avenidas, orientado a la gestión de avenidas en tiempo real, incorporando los datos de situación y escenarios hipotéticos de precipitación futura. En 2003 se desarrollaron modelos de aportaciones basados en ajustes de regresión de ecuaciones simples y sin base física que relacionen el caudal con variables meteorológicas y caudales del pasado inmediato. Estos modelos tienen resolución diaria y están pensados para aceptar predicciones meteorológicas como datos de entrada, y también la incorporación de datos de caudales pasados como variable predictora.

Por obsolescencia, o por diferencia de enfoque, ninguna de las actuaciones previas responde plenamente a las necesidades de las tareas de modelización planteadas en este estudio, con el que se pretende diseñar un sistema que, a partir los datos disponibles, proporcione información sobre las aportaciones esperables para los próximos días. Dicho sistema se basará en un modelo hidrológico de cuenca, con resolución temporal diaria.

Los datos hidrológicos y meteorológicos que proporcionan los sistemas de información de Canal de Isabel II son:

- Las series de datos de aportación diaria a los embalses están disponibles al menos desde 1986.
- También se dispone de datos meteorológicos de las variables más relevantes (precipitación diaria, temperaturas máxima y mínima diarias). Son valores medidos en las presas, que pueden considerarse representativos de las condiciones de las cuencas en virtud de su tamaño relativamente pequeño. Los sistemas automáticos de captura y transmisión de datos que Canal de Isabel II tiene instalados genera la actualización de estas series prácticamente en tiempo real.
- Desde hace algunos años Canal de Isabel II dispone de predicciones meteorológicas diarias cuantitativas y de calidad suficiente, con un alcance de varios días.

El ámbito del estudio se restringió a tres cuencas alimentadoras de embalses como representación modélica del conjunto de las cuencas de los embalses gestionados por Canal de Isabel II, por su tamaño y mayor o menor importancia hidrológica de la nieve. Las cuencas estudiadas son: Pedrezuela, La Jarosa y El Vado. La justificación de su incorporación al estudio piloto se desarrolla en el contenido del documento.

A priori, se planteó la utilización de un modelo hidrológico continuo o de balance, del estilo del HSPF, ya ensayado por Canal de Isabel II en la década de los 90. Dado su carácter conceptual, este tipo de modelos proporcionan resultados consistentes e interpretables en términos hidrológicos. Además, parece imprescindible que el modelo trate de forma explícita los procesos asociados a la evolución del manto de nieve, lo cual también apunta a los modelos continuos. Se pretende diseñar un sistema que proporcione información sobre las aportaciones esperables para los próximos días. Dicho sistema se basará en un modelo hidrológico de cuenca con resolución temporal diaria. La estrategia de modelización debía responder a determinados requisitos: los datos de entrada deben estar disponibles, todos los datos relevantes disponibles deben intervenir en el modelo, debe poderse implementar de forma razonable.

Sin embargo, los modelos continuos presentan la desventaja de no permitir la incorporación de caudales del pasado inmediato como variable de entrada, de modo que incumplían uno de los requisitos, ya que los caudales del pasado inmediato son conocidos y claramente relevantes; por una parte, la escala temporal de la recesión es mayor que el paso del modelo (el caudal de hoy se dejará sentir mañana como caudal de recesión); por otra, el caudal es un indicador del estado de humedad de la cuenca (la respuesta a la precipitación será, con toda probabilidad, mayor en situación de aguas altas). La necesidad de un modelo cuya formulación fuese relativamente sencilla imposibilitó la utilización de HSPF u otros igualmente sofisticados. Así, se ensayaron dos formulaciones más sencillas y de desarrollo relativamente reciente, conocidos como GR4J y SIMHYD; además, se han ensayado otras estrategias alternativas, en la línea de los modelos estadísticos, con el fin de disponer de una referencia del nivel de precisión esperable con modelos distintos de los de tipo continuo.

Resultados

Los resultados alcanzados con este estudio se resumen en los siguientes puntos:

- Se dispone de una formulación sencilla para construir modelos de aportaciones diarias a los embalses de Canal de Isabel II operables con los datos diarios disponibles. La formulación se basa en el modelo de balance GR4J al que se incorpora un algoritmo para representar los procesos asociados al manto de nieve. La combinación de ambos elementos es original y se ha denominado GR4JN.
- A la formulación anterior se le ha incorporado un sistema para la retroalimentación de errores del modelo, que permite introducir la información proporcionada por los datos recientes de caudal diario. Este tipo de retroalimentación es original en los modelos de balance y ha demostrado una notable eficacia para mejorar las estimaciones de caudal en los alcances de predicción cortos.
- El modelo se ha ensayado para la simulación de aportaciones diarias en tres embalses de los gestionados por Canal de Isabel II: Pedrezuela, La Jarosa y El Vado. Se ha contado con las series de datos hidrológicos y meteorológicos diarios desde 1986 y se han obtenido resultados satisfactorios.
- Se ha evaluado la capacidad predictiva de los modelos para diferentes alcances de predicción (de 1 a 10 días) mediante el concepto de eficiencia hidrológica, eficiencia del modelo en el supuesto de que los datos meteorológicos sean conocidos. En este supuesto, la predicción con n días de alcance supone que se conocen la precipitación y la evapotranspiración para el día que se predice y los anteriores, pero el último dato de caudal conocido es anterior en n días al dato que se desea estimar.

Como resulta esperable, la eficiencia hidrológica disminuye a medida que aumenta el alcance de predicción, teniendo como límite la eficiencia del modelo no retroalimentado o en funcionamiento libre (que representa el caso en el que el modelo no se apoya en ningún dato de caudal previo).

- Se han estudiado otras estrategias de modelización alternativas (modelo SIMHYD, modelos de regresión, modelo Q_b+Q_f). El modelo GR4JN proporciona, en general, mejores resultados en términos de eficiencia predictiva, a la vez que requiere ajustar menos parámetros.
- Se han explorado e identificado las vías para la explotación operativa de los modelos, concretamente en la estimación de aportaciones futuras para los próximos días. Dicha estimación se obtiene por la combinación de la representación actualizada del estado de humedad de la cuenca que proporciona el modelo, la información disponible sobre la meteorología esperable en los próximos días (estadística climatológica, predicciones meteorológicas) y de la capacidad de simulación hidrológica del modelo.
- Se ha desarrollado una aplicación que implementa el modelo y un conjunto de funciones para su operación integrada en los sistemas de información de Canal de Isabel II con actualización de datos, incorporación de predicciones meteorológicas, navegación por el calendario y visualización de resultados. Estas funciones permiten el mantenimiento actualizado del modelo y su aplicación operativa en la predicción de aportaciones futuras.

Se ha obtenido una herramienta capaz de traducir la información hidrológica y meteorológica, disponible diariamente en Canal de Isabel II, en información sobre aportaciones para los próximos días. El proceso descansa sobre un modelo hidrológico de balance que proporciona una representación del estado de humedad de la cuenca. Además, el estado de humedad simulado se corrige mediante retroalimentación con los datos de caudal de los días anteriores.

Los trabajos realizados han constituido un estudio piloto, centrado en una selección de tres cuencas. Los resultados obtenidos, por tanto, deben interpretarse también desde la perspectiva de la búsqueda de vías prometedoras para la continuación de la investigación. Una vía inmediata de continuación de los trabajos es la extensión del análisis al resto de cuencas alimentadoras de embalses gestionados por Canal de Isabel II. Una fase de evaluación de los resultados proporcionados por la herramienta actual en condiciones operativas puede ser la condición previa natural para iniciar esta actividad. En el desarrollo actual, concebido para un número limitado de cuencas, la aplicación que se ha desarrollado trata cada cuenca de forma separada. La extensión al resto de cuencas implicaría la necesidad de lograr algún tipo de integración de todas ellas en una herramienta de predicción única.

Con un enfoque más orientado a la investigación de nuevas posibilidades se plantean otras vías de continuación de los trabajos con el objetivo de :

- a) Incorporación de las predicciones meteorológicas probabilísticas
- b) Ensayo de nuevos sistemas de retroalimentación
- c) Mejora de la simulación de los procesos asociados al manto de nieve

Índice de contenidos

1. INTRODUCCIÓN página 12

- 1.1. Objetivos
- 1.2. Antecedentes
- 1.3. Planteamiento general
- 1.4. Ámbito del estudio

2. JUEGO DE DATOS página 15

- 2.1. Variables consideradas
- 2.2. Extensión de las series

3. ESTRATEGIAS DE MODELIZACIÓN página 17

- 3.1. Planteamiento
- 3.2. GR4J
- 3.3. SIMHYD
- 3.4. SIMHYD modificado
- 3.5. Estrategias alternativas
 - 3.5.1. Modelos de regresión
 - 3.5.2. Modelo $Q_b + Q_f$
- 3.6. Simulación de la nieve
 - 3.6.1. Planteamiento
 - 3.6.2. Efectos de la nieve sobre las aportaciones
 - 3.6.3. Formulación general
 - 3.6.4. Sectorización de la cuenca

4. RETROALIMENTACIÓN DE LOS MODELOS CONTINUOS página 29

- 4.1. Planteamiento general
- 4.2. Retroalimentación de GR4J
- 4.3. Retroalimentación de GR4JN
- 4.4. Eficiencia hidrológica y alcance de predicción

5. DESARROLLO Y SELECCIÓN DEL MODELO página 34

5.1. Modelos continuos sin simulación de nieve

5.2. Retroalimentación en GR4J

5.3. Comparación con otras estrategias

5.3.1. Modelos de regresión

5.3.2. $Q_b + Q_f$

5.3.3. Conclusión

5.4. Incorporación de la simulación de nieve

5.4.1. Funcionamiento libre

5.4.2. Retroalimentación

5.3.2. Ensayo para la cuenca de El Vado

5.5. Conclusión

6. APLICACIÓN OPERATIVA página 46

6.1. Información operativa proporcionada por el modelo

6.1.1. Estado de humedad de la cuenca

6.1.2. Aportación latente

6.1.3. Respuesta precipitación – caudal

6.1.4. Aportación esperada

6.1.5. Aportación predicha

6.2. Aplicación Informática

7. CONCLUSIONES página 56

7.1. Conclusiones generales

7.2. Propuestas para la continuación de los trabajos

8. ANEXOS página 58

Anexo 1. Referencias

Anexo 2. Índice de figuras

Anexo 3. Índice de tablas

1

Introducción

1.1. Objetivos

Penman (1961) definió la hidrología como la ciencia que trata de responder a la pregunta “¿Qué pasa con el agua de lluvia?”¹. Los modelos hidrológicos son herramientas que tratan de proporcionar respuestas cuantitativas a esta pregunta. En relación con ellos, sin embargo, el punto de vista del gestor del recurso trasciende necesariamente el plano científico para entrar en consideraciones de interés práctico. Así, una pregunta que seguramente representa mejor ese punto de vista es la siguiente “¿Puedo obtener alguna utilidad de los modelos hidrológicos?”.

El presente trabajo se centra en los modelos de simulación de aportaciones diarias y, en relación con la segunda pregunta, explora sus posibilidades actuales en un aspecto concreto: la predicción de aportaciones a corto plazo. En este sentido, el trabajo realizado se puede describir como el intento de dar respuesta a una pregunta adicional “¿Se puede obtener información sobre las aportaciones de los próximos días mediante modelos hidrológicos?”.

El desarrollo se circunscribe al sistema de Canal de Isabel II y, por tanto, se investigan modelos hidrológicos para las cuencas alimentadoras de sus embalses y que, además, puedan funcionar con los datos disponibles en sus sistemas de información.

El estudio tiene carácter experimental: su objetivo es evaluar varias estrategias de modelización, seleccionar la que se considere más adecuada y diagnosticar su eficacia en la predicción de aportaciones diarias a los embalses de Canal de Isabel II.

1.2. Antecedentes

La actividad de Canal de Isabel II en modelización hidrológica tiene, al menos, los siguientes antecedentes recientes:

1. En 1991 se abordó un trabajo de implementación y calibración de modelos de aportaciones con resolución diaria para cada uno de sus embalses (Canal de Isabel II 1991; Cubillo 1991). Se utilizó el modelo HSPF², fundamentalmente por su capacidad, al menos teórica, para simular los procesos de acumulación y fusión del manto de nieve. Los modelos debían servir para la estimación de aportaciones futuras a partir de escenarios meteorológicos hipotéticos para los próximos días y, especialmente, para evaluar las aportaciones esperables por la fusión del manto de nieve.

1 Citado en SINGH y WOOLHISER 2002

2 HSPF: Acrónimo de Hydrological Simulation Program - FORTRAN (HSPF) <http://www.epa.gov/ceampubl/swater/hspf/>. Software de simulación hidrológica y de calidad de agua.

2. En 1997 se desarrolló la aplicación SYGA³, sobre un trabajo previo de modelización hidrológica y de funcionamiento de embalses durante las avenidas (Canal de Isabel II 1997). Los modelos, en este caso, son modelos de episodio orientados a la gestión de avenidas en tiempo real, incorporando los datos de situación (volúmenes embalsados, caudales circulantes, precipitaciones registradas) y escenarios hipotéticos de precipitación futura.

Los modelos que constituyen el núcleo de simulación hidrológica de SYGA han servido, también, para definir los resguardos de seguridad de Canal de Isabel II y la actual forma de explotación en avenidas de las presas gestionadas por la Empresa.

3. En 2003 se desarrollaron modelos de aportaciones basados en ajustes de regresión de ecuaciones simples y sin base física que relacionen el caudal con variables meteorológicas y caudales del pasado inmediato. Estos modelos tienen resolución diaria y están pensados para aceptar predicciones meteorológicas como datos de entrada. Su principal novedad es la incorporación de datos de caudales pasados como variable predictora.

Bien por obsolescencia, bien por diferencia de enfoque, ninguna de estas actuaciones previas responde plenamente a las necesidades de las tareas de modelización planteadas en este estudio.

Por otra parte, gracias a diversas actuaciones en los sistemas de captura y transmisión de datos, Canal de Isabel II dispone de series de datos hidrológicos y meteorológicos diarios de unos 25 años de longitud (ver, epígrafe 1.3). En la actualidad, los sistemas de información de la Empresa proporcionan dichos datos prácticamente en tiempo real. Adicionalmente, Canal de Isabel II tiene contratado un servicio de predicciones meteorológicas diarias, con alcance de algunos días.

1.3. Planteamiento general

Los sistemas de información de Canal de Isabel II proporcionan el siguiente conjunto de datos hidrológicos y meteorológicos:

- a) Las series de datos de aportación diaria a los embalses están disponibles para, aproximadamente, los últimos 25 años.
- b) También para los últimos 25 años se dispone de datos meteorológicos de las variables más relevantes (precipitación diaria, temperaturas máxima y mínima diarias). Se trata de los valores medidos en las presas, que pueden considerarse más o menos representativos de las condiciones de las cuencas en virtud del tamaño relativamente pequeño de estas.
- c) Gracias a los sistemas automáticos de captura y transmisión de datos que Canal de Isabel II tiene instalados, las series de datos citadas en (a) y (b) se actualizan prácticamente en tiempo real.
- d) Desde hace algunos años Canal de Isabel II dispone de predicciones meteorológicas diarias cuantitativas y de calidad suficiente, con un alcance de varios días.

Se pretende diseñar un sistema que, a partir los datos anteriores, proporcione información sobre las aportaciones esperables para los próximos días. Dicho sistema se basará en un modelo hidrológico de cuenca con resolución temporal diaria.

³ SYGA: Sistema y Gestión de Avenidas de Canal de Isabel II.

A priori, se plantea la utilización de un modelo hidrológico continuo o de balance, del estilo del HSPF, ya ensayado por Canal de Isabel II en los primeros años 1990. Dado su carácter conceptual, este tipo de modelos proporcionan resultados consistentes e interpretables en términos hidrológicos. Además, parece imprescindible que el modelo trate de forma explícita los procesos asociados a la evolución del manto de nieve, lo cual también apunta a los modelos continuos.

Sin embargo, este tipo de formulaciones presentan la desventaja de no permitir la incorporación directa de caudales del pasado inmediato como variable de entrada. En este caso, los caudales del pasado inmediato son conocidos y, además, claramente relevantes (existe autocorrelación en los caudales diarios, que además tiene sentido hidrológico claro). Para solventar esta carencia se plantea incorporar al modelo continuo un método de retroalimentación de errores. Se parte de la idea de tomar el caudal como un indicador del estado de humedad de la cuenca y que, entonces, las diferencias entre caudal simulado y caudal observado pueden deberse, al menos en parte, a un desajuste entre el estado de humedad de la cuenca y su representación en el modelo. El método consiste en corregir el estado de humedad simulado en función de las diferencias entre caudal simulado y caudal observado para los últimos datos conocidos.

1.4. Ámbito del estudio

Por ser un estudio piloto, el ámbito del estudio se ha restringido a tres cuencas alimentadoras de embalses. Se han seleccionado procurando conseguir una buena representación del conjunto de las cuencas de los embalses gestionados por Canal de Isabel II, al menos en relación con dos factores: tamaño y mayor o menor importancia hidrológica de la nieve. Las cuencas estudiadas y la justificación de su incorporación al estudio piloto son las siguientes:

a) Pedrezuela

Se trata de una cuenca en la cual la importancia hidrológica de la nieve se presume reducida. Esto ha permitido iniciar el estudio con una versión del problema más manejable en la que se prescinde de los fenómenos asociados a la nieve.

b) La Jarosa

A diferencia de la anterior, se supone que los fenómenos de acumulación y fusión de nieve inciden de forma apreciable en las aportaciones de esta cuenca. Por otra parte, se trata de una cuenca de tamaño pequeño dentro del conjunto de cuencas de embalses de Canal de Isabel II.

c) El Vado

En el conjunto de cuencas relevantes para Canal de Isabel II, es una cuenca de tamaño grande y, además, los fenómenos asociados a la nieve se suponen relevantes.

2

Juego de datos

2.1. Variables consideradas

Las variables temporales utilizadas para los modelos y las fuentes de datos son las siguientes:

- **Aportación diaria de la cuenca:**
Se toma del campo CAUDAL_ENT_CPROP de la tabla DATOS_EMBALSES de la base de datos hidrometeorológicas de Canal de Isabel II. Las series de datos han sido revisadas y validadas por diversos procedimientos. La revisión ha llevado al rechazo de algunos datos (nunca más del 2 por ciento).
- **Precipitación diaria en la presa:**
Se toma del campo PRECIPITACIÓN de la tabla DATOS_EMBALSES de la base de datos hidrometeorológicas de Canal de Isabel II. Las series se han revisado y, en ocasiones, se han rellenado lagunas, siempre con valor 0 (casi todos en el periodo de calentamiento, ver apartado 2.2).
- **Temperaturas máxima y mínima diarias:**
Se toma de los campos TEMP_MAX y TEMP_MIN de la base de datos hidrometeorológicos de Canal de Isabel II. Se han revisado las series y, de forma ocasional, se han rechazado datos y rellenado lagunas (por interpolación en la serie).
- **ETP diaria:**
Se ha calculado mediante una formulación simple, a partir de la temperatura media diaria y la duración del día. La formulación se ajusta para que los valores agregados mensuales coincidan con unos valores de referencia obtenidos en MAPA 1989 y en CIF internet⁴ y basados en el método de Thornthwaite⁵.

Además de los datos temporales, se ha hecho uso de los datos de superficie de cuenca, latitud e hipsometría de la cuenca.

2.2. Extensión de las series

Se dispone de datos diarios de variables hidrometeorológicas, tomadas en cada una de las presas, desde la fecha de 1 de enero de 1986. En el momento de realizar el estudio se contaba con datos hasta el 28 de febrero 2006. El periodo de datos comprende, por tanto, una serie de 19 años hidrológicos completos (1986-87 a 2004-05) precedida y seguida de sendos segmentos de datos de longitud inferior a un año (10 y 5 meses, respectivamente).

Para el ajuste de los modelos, el periodo de datos se ha subdividido de la siguiente manera:

⁴ CIF internet: Phytosociological Research Center (CIF). <http://www.ucm.es/info/cif>

⁵ Thornthwaite: <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/climatologia-aplicada-a-la-ingenieria-y-medioambiente/contenidos/evapotranspiraciones/metodosevapotranspiraciones.pdf>

1. Periodo de calentamiento: desde 1/1/1986 hasta 30/9/1986.
2. Periodo de calibración: desde 1/10/1986 hasta 30/9/2000, (14 años hidrológicos completos).
3. Periodo de validación: desde 1/10/2000 hasta 30/9/2005, (5 años hidrológicos completos).
4. Periodo de comprobación: desde 1/10/2005 hasta 28/2/2006.

El periodo de calentamiento ("warming up") tiene por finalidad amortiguar el efecto de las condiciones iniciales de modo que estas no afecten significativamente al periodo de calibración. Es imprescindible en los modelos continuos y, por coherencia, se ha mantenido también al ensayar formulaciones independientes de las condiciones iniciales.

La serie de 19 años hidrológicos completos queda dividida en un periodo de calibración y otro de validación para el ajuste de los modelos. La proporción 14 a 5 entre calibración y validación parece adecuada y 14 años se considera un periodo suficiente para calibrar adecuadamente un modelo.

Los últimos 5 meses de datos no se incluyen en el periodo de validación, porque se considera conveniente que este sea un conjunto de años hidrológicos completos. Sin embargo, se tienen en cuenta en la inspección visual de gráficos de comportamiento del modelo, como comprobación adicional.

3

Estrategias de modelización

3.1. Planteamiento

Existe una notable variedad de aproximaciones al problema de la simulación de aportaciones. De forma concisa, podemos destacar las siguientes:

- **Modelos continuos:** los clásicos modelos de balance, conceptuales, agregados, basados en representaciones matemáticas de los distintos procesos hidrológicos que tienen lugar en la cuenca. Dicha representación matemática suele formularse en términos de un conjunto de almacenamientos de agua, cada uno de los cuales está regido por un conjunto de ecuaciones que describen sus entradas y salidas.
- **Modelos métricos:** modelos sin base conceptual que proporcionan una descripción del comportamiento de la serie de aportaciones en términos de sus relaciones estadísticas con otras series de datos relevantes (aportaciones anteriores, precipitaciones, etc.). Estas relaciones se establecen mediante modelos estadísticos (regresión, series temporales, etc.) o funciones de transferencia cuyos parámetros se determinan ajustando un juego de datos de prueba.
- **Modelos distribuidos:** incorporan a la sofisticación conceptual de los modelos de balance el tratamiento directo de la heterogeneidad espacial, utilizando información geográfica distribuida. El factor limitante para su aplicación práctica en la actualidad es la dificultad para cubrir las necesidades de información distribuida de entrada así como la insuficiente densidad espacial de los datos disponibles para su calibración.
- **Otras técnicas:** no faltan otras técnicas, de corte más vanguardista (por ejemplo, redes neuronales), en un campo en que los ensayos no son demasiado costosos. Sin embargo, cuando se trata de un modelo aplicado, parece más seguro acudir a técnicas avaladas por la práctica.

La estrategia de modelización a adoptar debe responder a determinados requisitos:

- a) Los datos de entrada que necesite deben estar disponibles.
- b) Todos los datos relevantes disponibles deben intervenir en el modelo.
- c) Debe poderse implementar de forma razonable.

El criterio (a) es claramente restrictivo. Por muy buenos resultados que dé un modelo, este será inútil si los datos de entrada que precisa no pueden obtenerse en tiempo y forma. El criterio (b) lo complementa, es decir, un modelo que no utilice toda la información relevante disponible siempre será claramente mejorable.

Por otra parte, parece imprescindible que el modelo trate de forma explícita los procesos asociados a la evolución del manto de nieve, dada la importancia de este fenómeno en el régimen de aportaciones de los embalses de Canal de Isabel II. Esto apunta a modelos continuos como el HSPF, ya ensayado por Canal de Isabel II en los primeros años 1990. Los modelos continuos, por otra parte, presentan la ventaja de su base conceptual, que garantiza un comportamiento consistente y robusto (válido para cuencas diversas y para situaciones alejadas de las que han servido para la calibración).

Sin embargo, los modelos continuos presentan la desventaja de no permitir la incorporación de caudales del pasado inmediato como variable de entrada, de modo que incumplirían el requisito (b), ya que los caudales del pasado inmediato son conocidos y claramente relevantes; por una parte, la escala temporal de la recesión es mayor que el paso del modelo (el caudal de hoy se dejará sentir mañana como caudal de recesión); por otra, el caudal es un indicador del estado de humedad de la cuenca (la respuesta a la precipitación será, con toda probabilidad, mayor en situación de aguas altas).

A priori, este estudio se centra en modelos de tipo continuo y pretende soslayar el inconveniente expuesto en el párrafo anterior mediante un sistema de retroalimentación de errores que se describe en el epígrafe 4. Para la aplicación de dicho sistema es necesario un modelo cuya formulación sea relativamente sencilla. Esto imposibilita la utilización de HSPF u otros igualmente sofisticados. En cambio, se han ensayado dos formulaciones más sencillas y de desarrollo relativamente reciente, **GR4J**⁶ y **SIMHYD**⁷.

Además, se han ensayado otras estrategias alternativas, en la línea de los modelos estadísticos, con el fin de disponer de una referencia del nivel de precisión esperable con modelos distintos de los de tipo continuo.

3.2. GR4J

El modelo diario GR4J fue desarrollado en Cemagref⁸ en el año 2000. Se ha diseñado expresamente para la simulación hidrológica en el nivel diario, persiguiendo una formulación sencilla pero eficaz, y con un número reducido de parámetros.

Los datos de entrada son la precipitación diaria sobre la cuenca, **P**, y la evapotranspiración potencial diaria, **ETP**. Utiliza únicamente 4 parámetros:

- **X1** (mm): capacidad máxima del almacenamiento de producción
- **X2** (mm): factor de intercambio con capas profundas del subsuelo
- **X3** (mm): capacidad máxima del almacenamiento de transporte
- **X4** (días): tiempo base del hidrograma unitario **HU1**

El modelo **GR4J** describe el funcionamiento hidrológico de la cuenca mediante dos sistemas: el de producción y el de transporte (**routage**). Estos sistemas están gobernados por sendos almacenamientos, **S** y **R** respectivamente.

En la figura 1 se representan los componentes del modelo y se esquematiza su funcionamiento. En términos conceptuales, se puede describir el modelo **GR4J** de la siguiente manera:

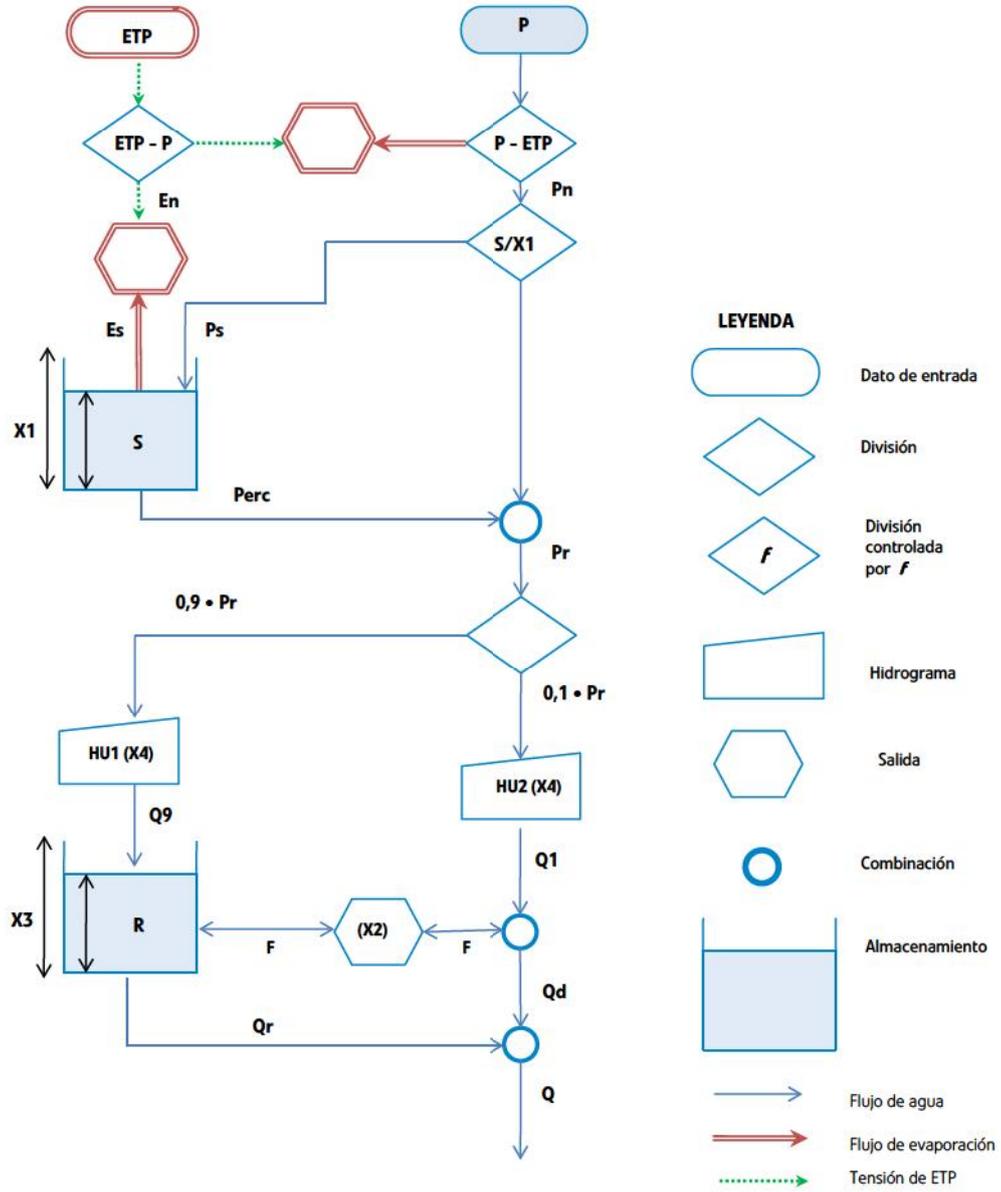
- a) El sistema de producción controla la respuesta de la cuenca a las precipitaciones (determinando la fracción de precipitación que se "infiltra") y, además, mediante **Perc**, proporciona una aportación de baja frecuencia que cabría identificar con los caudales base. Así, **X1** estaría relacionado con la capacidad de infiltración y retención de agua del suelo e, indirectamente, con la recesión de los caudales base.
- b) El sistema de transporte recoge toda la escorrentía que se origina en la cuenca, tanto la de respuesta rápida (**Pn-Ps**), como la de respuesta lenta (**Perc**). Esta escorrentía se divide en dos fases, una "directa", que sufre exclusivamente el retraso impuesto por el hidrograma **HU2**, y otra indirecta, más o menos identificable con el concepto de "interflow", que funciona a través del almacenamiento de transporte. Así pues, **X4** estaría relacionado con el tiempo de respuesta de la cuenca y **X3** con la recesión de los caudales de aguas altas.

⁶ GR4J: De sus siglas en francés "modèle du Génie Rural à 4 paramètres au pas de temps Journalier" Modelo de simulación hidrológica, que con sólo 4 parámetros realiza una adecuada representación de los caudales medios diarios que se generan en una cuenca. www.cemagref.fr/webgr/Codes/code_gr4j.htm

⁷ SIMHYD: Is a conceptual rainfall runoff model that estimates daily stream flow from daily rainfall and areal potential evapotranspiration data. <http://www.ewater.com.au/glossary/QID.iib63f2c.10/QID.iib63f2c.10.qv5pxe.249.html>. Modelo conceptual de la escorrentía de lluvia que estima los flujos diarios basados en la precipitación diaria y los datos de evapotranspiración potencial del área estimada.

⁸ CEMAGREF: www.cemagref.fr/webgr/Codes/code_gr4j.htm

Figura 1. Componentes y esquema de funcionamiento del modelo



El estado hidrológico al final de un intervalo queda representado por el contenido de humedad de los almacenamientos, S y R , y por los caudales pendientes de los hidrogramas $HU1$ y $HU2$. Estos últimos quedan determinados por los valores de Pr del día en cuestión, y los $N-1$ anteriores, siendo N el primer entero mayor que $2 \cdot X4$.

Una característica significativa del modelo **GR4J** es su insólita simplicidad en el sistema de parámetros. Es habitual que los modelos de balance de resolución diaria presenten del orden de una o más decenas de parámetros y **GR4J** funciona sólo con 4. Esta peculiaridad del **GR4J** puede atribuirse a dos factores:

- El número de almacenamientos de agua en la cuenca se limita a 2.
- Muchos de los elementos de la formulación potencialmente parametrizables aparecen fijos.

Para la aplicación del modelo a las cuencas ensayadas se ha adoptado el criterio de mantener $X2=0$. Es decir, se asume que el intercambio con acuíferos profundos, de existir, es despreciable.

Por otra parte, el parámetro de tiempo $X4$ está directamente relacionado con el tiempo de respuesta a una precipitación. En las cuencas ensayadas los datos revelan que el efecto de una precipitación importante se siente en el caudal del mismo día, lo cual impone que $HU2(1)$ tenga un valor relativamente alto. Esto sólo es posible con valores de $X4$ no excesivamente grandes ($X4$ es el tiempo punta de $HU2$). Se ha adoptado el criterio de limitar el valor de $X4$ al rango comprendido entre 0,5 y 2 (para $0 < X4 < 0,5$ el modelo se comporta igual que para $X4=0,5$).

También es significativo en la formulación de **GR4J** que todas las ecuaciones que gobiernan las entradas y salidas de los almacenamientos tienen una propiedad que podríamos denominar "ser fraccionables" o "ser invariantes en relación con el fraccionamiento del intervalo de simulación". Por ejemplo, el valor de evapotranspiración Es que resulta para la acción de una ETP potencial neta En sobre un nivel de almacenamiento S es la misma que la que se obtiene por la acción sucesiva sobre el mismo nivel de almacenamiento inicial de dos ETP netas, En_1 y En_2 , siempre que se verifique que $En_1 + En_2 = En$. Esta propiedad no es compartida por muchas formulaciones de modelos hidrológicos y, sin embargo, parece claramente deseable desde el punto de vista conceptual.

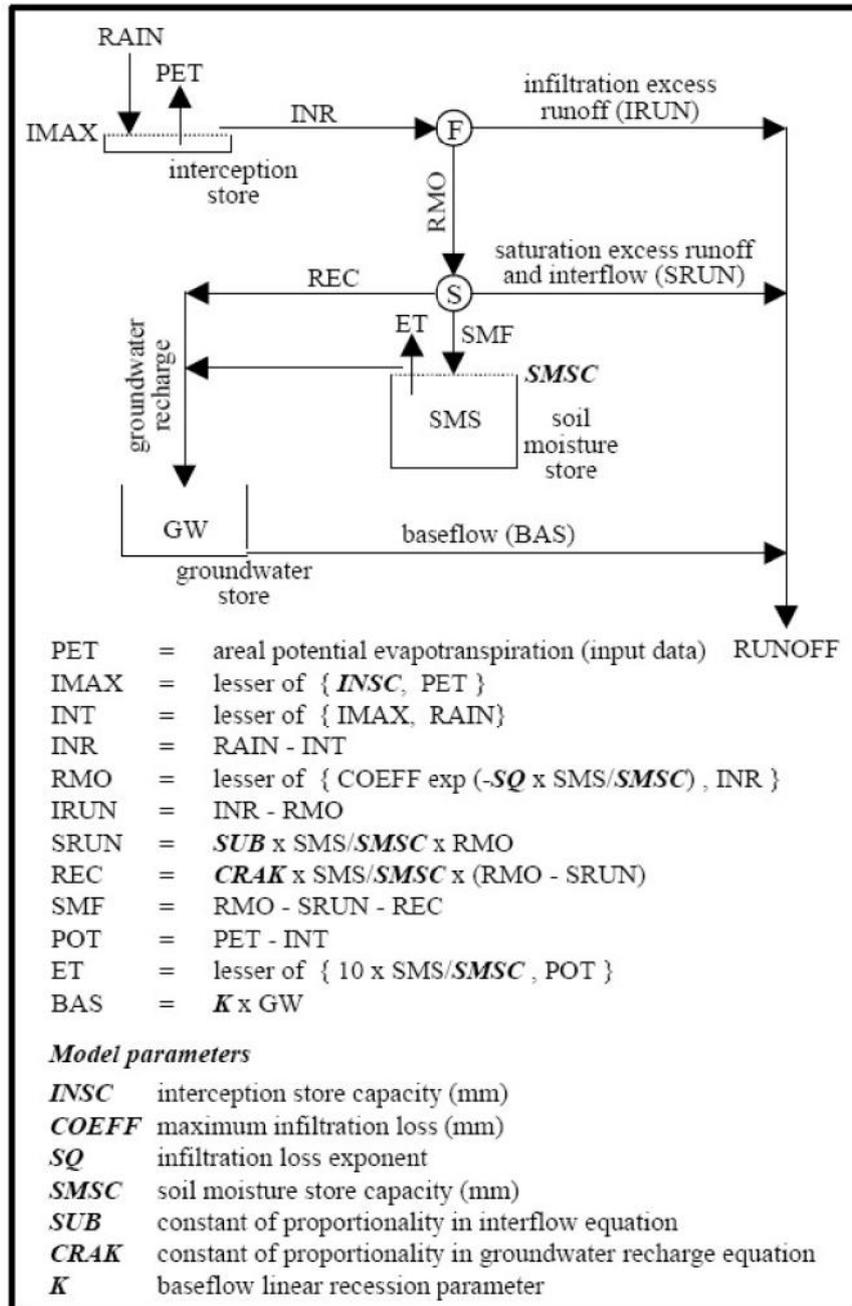
3.3. SIMHYD

El modelo **SIMHYD** es un modelo conceptual continuo que estima caudales diarios a partir de precipitación y ETP diarias. Ha sido ampliamente probado en Australia, para cuencas de tamaño pequeño, o mediano (entre 100 y 1000 kilómetros cuadrados) y régimen hidrológico diverso (600 -1600 milímetros de precipitación media anual), (Chiew et al. 2002). Aunque se trata de un modelo diario, en las referencias consultadas se ha calibrado exclusivamente para reproducir las series de caudales mensuales.

Se trata de un modelo de balance relativamente simple cuya formulación se presenta en la figura 2. Tiene 7 parámetros y 3 almacenamientos: almacenamiento de intercepción, almacenamiento de humedad en el suelo (**SMS**, Soil Moisture Storage) y almacenamiento subterráneo (**GW**, Ground Water). El caudal diario se forma a partir de tres componentes:

- Exceso de infiltración (**IRUN**), es la fracción del exceso de intercepción que no logra infiltrarse.
- Exceso de saturación y escorrentía sub-superficial (**SRUN**), es la fracción de la infiltración que no llega a entrar en el almacenamiento del suelo ni en el subterráneo.
- Caudal base (**BAS**), es el caudal de descarga del almacenamiento subterráneo, que se calcula como una recesión lineal.

Figura 2. Formulación Modelo SIMHYD



Fuente: CHIEW et al. 2002. Esquema de formulación del modelo SIMHYD

La formulación del modelo **SIMHYD** tal y como se encuentra en las referencias consultadas no ha resultado adecuada para representar el régimen de caudales diarios en cuencas como las incluidas en este estudio. El análisis de la formulación permite detectar un exceso de sofisticación en la representación de algunos componentes y, al mismo tiempo, carencias en otros. Estas carencias se manifiestan en los resultados, muy pobres, obtenidos para Pedrezuela.

Por ejemplo, el paso **F** en la descomposición del exceso de infiltración no resulta útil. Téngase en cuenta que **IRUN** y **SRUN**, esto es, dos de las tres fracciones que componen el caudal simulado, tienen un tiempo de respuesta equivalente, ambas responden a la precipitación del mismo día. En cambio, la única fracción de escorrentía con una respuesta diferida en el tiempo es **BAS**, por lo que esta tiene que integrar el conjunto de recesiones de los caudales reales. La representación de este conjunto mediante una simple ecuación de recesión lineal parece insuficiente.

3.4. SIMHYD modificado

Ante las carencias observadas en la formulación del modelo **SIMHYD**, se ha decidido ensayar una formulación alternativa, obtenida mediante la modificación de la formulación original, y que se ha denominado **SIMHYDmod**.

Las modificaciones introducidas son las siguientes:

- a) Se suprime el almacenamiento de intercepción. En su lugar, la **ETP** diaria actúa sin restricción sobre la precipitación diaria y el exceso, si lo hay, forma **INR**. Esta modificación ahorra un parámetro (**INSC**) que no resultó operativo en la aplicación de **SIMHYD** a Pedrezuela.
- b) Se suprime la división **F**. Se suprime **IRUN** y todo **INR** entra en el reparto entre infiltración **SMF**, recarga **REC** o generación de exceso de escorrentía. Esto permite ahorrar dos parámetros, **COEFF** y **SQ**.
- c) Se interpone un almacenamiento de **interflow** entre el exceso de escorrentía y la salida de la cuenca, **SRUN**. **SRUN** representa la escorrentía directa y subsuperficial, y su nivel temporal de respuesta está gobernado por el almacenamiento **SINT**, sin límite de capacidad y con una constante de recesión **KI**. Esta modificación exige, pues, introducir un nuevo parámetro.
- d) La recarga de **SINT** se produce a partir del exceso de infiltración **RINT**, variable que integra las salidas **IRUN** y **SRUN** del modelo original. El cálculo de **RINT** toma como referencia la ecuación original de **SRUN**, que se sofisticó ligeramente, añadiendo un exponente (la ecuación proporcional original parece demasiado sencilla para gobernar, por sí sola, la generación de exceso de infiltración). Se añade, por tanto, un parámetro, que se denominará **SQ2** por analogía con **SQ**.

En conjunto, se suprimen 3 parámetros y se añaden 2, por lo que queda un modelo de 6 parámetros en total:

- **SMSC** capacidad del almacenamiento de humedad del suelo, medido en milímetros
- **SQ2** exponente de la ecuación del exceso de infiltración
- **SUB** coeficiente de la ecuación del exceso de infiltración
- **KI** constante de recesión del almacenamiento de interflow
- **CRAK** coeficiente de la ecuación de recarga subterránea
- **KB** constante de recesión del almacenamiento subterráneo

El funcionamiento del modelo **SIMHYDmod** para las series de aportaciones diarias a Pedrezuela ha resultado mucho mejor que el de **SIMHYD** y equiparable al del modelo **GR4J**.

3.5. Estrategias alternativas

Los modelos estadísticos citados en el epígrafe 3.1 tienen capacidad para incorporar directamente la información proporcionada por los caudales del pasado inmediato. En este apartado se describen dos estrategias de este tipo, investigadas en este trabajo, y que deben considerarse como competidoras de la descrita en los epígrafes anteriores. Por tanto, han de servir como referencia para evaluar la eficiencia de esta última.

3.5.1. Modelos de regresión

La regresión lineal es una técnica ampliamente utilizada para estimar el valor de una variable dependiente a partir de un conjunto de variables explicativas. Su principal limitación, claramente relevante en el caso de variables hidrológicas, es que sólo admite relaciones lineales. Esta limitación se soslaya parcialmente introduciendo términos de interacción.

Se trata de determinar un modelo lineal (con términos de interacción) que relacione el caudal del día con la precipitación y ETP sincrónicas y los datos de caudal de días anteriores. La investigación realizada se ha encaminado a buscar un modelo tan eficiente como sea posible y, al mismo tiempo, consistente desde el punto de vista hidrológico. Esto último es exigible si se desea obtener una formulación robusta, esto es, válida para otras cuencas y para situaciones más o menos alejadas de las que se registran en los bancos de datos.

Se ha seguido una estrategia incremental. En primer lugar, se ha planteado una formulación sencilla que surge de un planteamiento conceptual muy simple, pero evidente, es decir, el caudal de un día se puede suponer formado por dos componentes, un caudal de respuesta rápida a la precipitación y un caudal remanente de días anteriores, o caudal de recesión. Este planteamiento configura un modelo inicial con dos predictores, la precipitación sincrónica y el caudal del día anterior:

$$Q_i = a_0 + a_1 \cdot P_i + a_2 \cdot Q_{i-1} \quad [1]$$

Los subíndices de las variables indican el intervalo de tiempo a que se refieren, siendo "i" el correspondiente al día problema.

Este modelo se va sofisticando progresivamente, introduciendo nuevas variables predictoras con las que se intenta suplir las carencias observadas. El ámbito de búsqueda de predictores se ha restringido a los datos hidrometeorológicos básicos, diarios o promediados para periodos más largos, y a los términos de interacción entre ellos, dos a dos. Se ha renunciado a variables compuestas más sofisticadas para evitar formulaciones artificiosas, menos proclives a la robustez en el sentido expresado más arriba. La selección de variables predictoras y de formulaciones se ha basado en la consistencia hidrológica y en unos exigentes criterios de significación estadística.

El proceso se ha dado por concluido con la segunda formulación, que involucra 4 predictores y 3 términos de interacción entre ellos. En esta formulación P_n representa precipitación neta, esto es, la diferencia no negativa entre P y $ETP \cdot Q_{p10}$ representa el promedio de caudal de los 10 días anteriores y ETP_{p30} es el promedio de ETP de los 30 días anteriores al día problema.

$$Q_i = a_0 + a_1 \cdot P_n + a_2 \cdot Q_{i-1} + a_3 \cdot P_n \cdot Q_{i-1} + a_4 \cdot Q_{p10} + a_5 \cdot P_n \cdot Q_{p10} + a_6 \cdot P_n \cdot (ETP_{p30})^{-1} \quad [2]$$

3.5.2. Modelo Qb + Qf

Se ha denominado modelo Qb + Qf al ensayo realizado para obtener un modelo con características similares a las de los modelos de regresión (en particular, con capacidad para utilizar directamente los datos de caudal del pasado inmediato) pero con un soporte conceptual más desarrollado. El planteamiento conceptual se basa en los siguientes supuestos:

- El caudal diario se compone de dos fracciones: caudal base (Qb) y caudal de respuesta rápida (Qf). El primero es la componente con mayor inercia, procedente de los almacenamientos de humedad con tiempo de respuesta largo (meses o años), como el almacenamiento subterráneo. El caudal de respuesta rápida es la fracción de caudal que se origina como respuesta a las precipitaciones recientes (últimos días u horas) y se identifica con la escorrentía directa y la subsuperficial.
- Conocida la serie de caudales diarios, los caudales base se pueden estimar mediante "filtros" matemáticos que separan la componente de baja frecuencia de la serie de caudales diarios tratada, por tanto, como si fuera una señal compuesta por varias frecuencias (Eckhardt, 2005; Furey y Gupta, 2001).
- El caudal de respuesta rápida, diferencia entre el caudal total y el caudal base, puede expresarse como suma de dos componentes: una componente de respuesta directa a la precipitación del día y una componente de recesión.
- La componente de respuesta a la precipitación se puede expresar como proporcional a la precipitación neta, pero modificada por algún tipo de indicador del estado de humedad previo de la cuenca.
- El indicador de estado de humedad de la cuenca de un día puede expresarse como suma de un término de persistencia (una fracción del estado de humedad anterior) y un término dependiente de las condiciones del día. La precipitación y el caudal del día inciden en el sentido de aumentar el índice y la ETP en sentido contrario.
- El modelo es consistente con la hipótesis de "estado final estacionario" según la cual, una cuenca sometida indefinidamente a una precipitación neta constante tiende a una situación estacionaria en la cual, el caudal desaguado es equivalente a la precipitación neta y el resto de variables hidrológicas permanece constante en el tiempo.

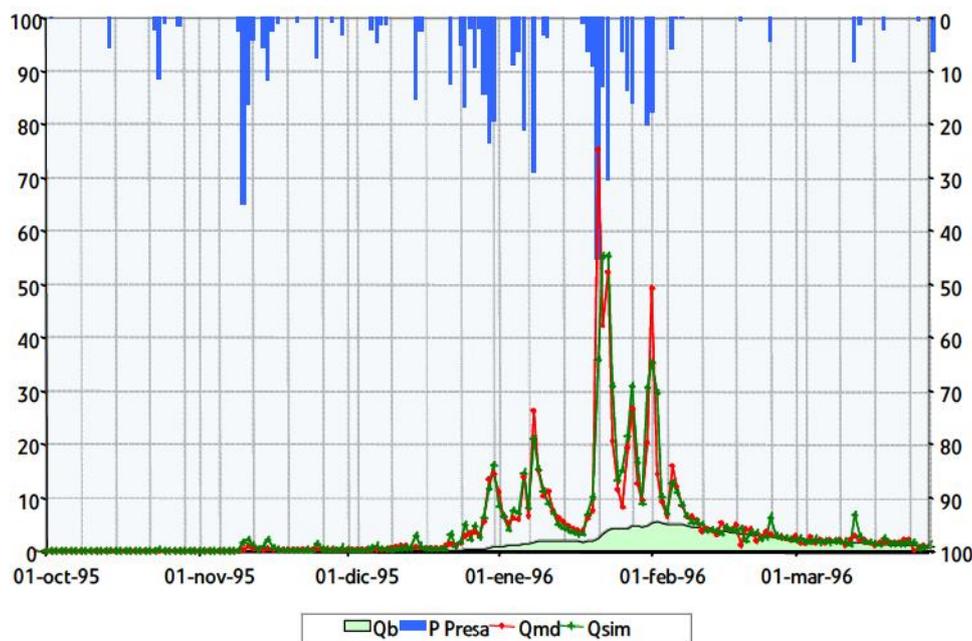
A partir de estos supuestos y adoptando algunas decisiones de diseño se desarrolla una formulación original que, a priori, parece prometedora. El modelo requiere la determinación de 6 parámetros, que son los indicados en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros del modelo Qb + Qf

Parámetro	Significado	Rango
A, B	Constantes de la ecuación de filtro recursivo generalizado para el caudal base (Eckhardt 2005) Siendo: <ul style="list-style-type: none"> $\alpha = A/(1-B)$ la tasa de recesión diaria del caudal base $BFI_{max} = B/(1-A)$ el valor límite máximo de la relación caudal base/caudal total, en un supuesto de caudal constante 	$0 < A$ $0 < B$ $A + B < 1$
α	Factor de persistencia del índice de humedad	$0 \leq \alpha \leq 1$
β	Parámetro de la ecuación del factor variable de respuesta rápida a la precipitación en función del índice de humedad	$0 \leq \beta$
d	Tasa de recesión diaria del caudal de respuesta rápida	$0 < d < 1$

En el figura 3 se muestra el resultado de la aplicación del modelo a las aportaciones de Pedrezuela. Se sombrea la fracción de caudal simulado que el modelo considera que es caudal base.

Figura 3. Pedrezuela Qb + Qf retroalimentado



3.6. Simulación de la nieve

3.6.1. Planteamiento

En la actualidad, el desarrollo de un modelo que incluya la simulación del manto de nieve para las cuencas de los embalses de Canal de Isabel II cuenta con la dificultad inicial de que no se dispone de series históricas de datos de cantidad de nieve acumulada (superficie de manto de nieve o espesor de nieve). Esto obliga a tratar la parte del modelo relacionada con la nieve como una especie de "caja negra", es decir, un submodelo incorporado al modelo general pero cuyos resultados no son contrastables directamente. La bondad del submodelo se evalúa de forma indirecta, si el modelo en su conjunto proporciona buenos resultados finales (buenas estimaciones de las aportaciones diarias), se acepta que cada una de sus partes proporciona resultados intermedios adecuados por lo que, en particular, se consideran adecuadas las estimaciones de la escorrentía de fusión de nieve.

Dadas las dificultades para la calibración explícita no resultaría creíble una formulación muy detallada de la dinámica del manto de nieve. Sin embargo, es necesario que la formulación permita mejorar el comportamiento del modelo en situaciones como la que se presenta en el epígrafe siguiente.

3.6.2. Efectos de la nieve sobre las aportaciones

Los procesos nivales tienen dos efectos principales, diferir la escorrentía correspondiente a las precipitaciones en forma de nieve, e incrementar la respuesta a precipitaciones en forma de lluvia (cuando esta se produce sobre un manto de nieve y es capaz de inducir su fusión). El manto de nieve se comporta como un almacenamiento de humedad controlado por los procesos específicos de acumulación y fusión de nieve.

Este efecto es perceptible en el comportamiento de las aportaciones, sobre todo si se comparan con las aportaciones estimadas con un modelo que no incluye simulación de procesos nivales. En el ejemplo que se recoge a continuación se han estudiado las aportaciones diarias al embalse de La Jarosa durante el mes de enero de 1997, que se comparan con las que proporciona el modelo GR4J (ver figura 4).

Se aprecia como las precipitaciones de los días 2 a 8 de enero no tienen apenas repercusión en las aportaciones, en especial si se comparan con la estimación del modelo (línea verde). En cambio, entre los días 10 y 14 de enero se produce un incremento de caudal que no responde a precipitaciones.

Si se estudia la serie de temperaturas diarias registradas en La Jarosa, en ese intervalo se observa que los días 2 a 7 de enero corresponden a un periodo muy frío, por lo que es de suponer que las precipitaciones correspondientes fueron en forma de nieve y se acumularon en la cuenca. A partir del 8 de enero se produce un ascenso de temperaturas, y los días 10 a 13 son relativamente calurosos.

Estas temperaturas y las precipitaciones del día 10 deben de ser la causa del deshielo de la nieve acumulada en los días anteriores.

3.6.3. Formulación general

Los requerimientos de este estudio y, sobre todo, las limitaciones de los datos disponibles (en particular, la ausencia de series de datos cuantitativos sobre cantidad de nieve en la cuenca) imponen la aplicación de un modelo simple. La formulación que se ha adoptado parte del método de los grados-día (Gupta 1989 pág. 108) para estimar la fusión de la nieve, con las adiciones necesarias para completar el modelo.

Figura 4. Presa de La Jarosa



El modelo propuesto lleva un balance de cantidad de nieve en la cuenca, expresada en el equivalente de agua en milímetros. La precipitación caída en forma de nieve se añade, y la fusión se resta a esta cantidad de agua equivalente en el manto de nieve. Se asume que el proceso está gobernado esencialmente por la temperatura media del día, que se adopta como indicador del estado térmico general de la atmósfera y el manto de nieve.

El modelo tiene tres parámetros que hay que determinar, la temperatura umbral T_b (que discrimina entre situaciones de acumulación y situaciones de fusión) y los factores C_A y C_p , que determinan las ecuaciones de fusión del manto de nieve. T_b debería ser una temperatura alrededor de cero grados Celsius, si bien puede apartarse de ese valor en la medida en que el dato de temperatura utilizado como entrada (temperatura en la presa) difiera de la temperatura representativa de la cuenca.

La formulación del modelo es la siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Si } T \geq T_b \\ F &= \min\{N; (C_A + C_p \cdot P) \cdot (T - T_b)\} \\ A &= 0 \\ \\ \text{Si no} \\ F &= 0 \\ A &= P \\ \\ ETP &\leftarrow \max\{0; ETP - F/6,8\} \\ N &\leftarrow N + A - F \end{aligned}$$

[3]

Donde:

- T es la temperatura media del día (grados Celsius)
- P es la precipitación del día (milímetros)
- N es la cantidad de agua equivalente en el manto de nieve (milímetros)
- A es la cantidad de precipitación que pasa a incrementar el manto de nieve (en milímetros)
- F es la cantidad de agua que sale del manto de nieve por fusión (milímetros)

El modelo de manto de nieve se sitúa "por encima" o "antes" del modelo hidrológico sin nieve. Es decir: las entradas del modelo (precipitación y ETP) actúan primero en el modelo de manto de nieve y las entradas del modelo de cuenca se determinan a partir de la simulación del manto de nieve:

- a) Entrada de agua (precipitación efectiva). Si el modelo de nieve estima que la precipitación es en forma de nieve acumulable, la precipitación efectiva es nula. En cambio, si el modelo estima que hay fusión de manto de nieve, esta pasa a incrementar la precipitación efectiva.
- b) ETP: es la ETP original corregida, en su caso, para considerar la reducción de energía disponible por fusión del manto de nieve.

Es decir, el modelo de manto de nieve actúa modificando la entrada del modelo hidrológico general, interponiendo un tercer almacenamiento, N.

3.6.4. Sectorización de la cuenca

La formulación propuesta no permite un tratamiento de la heterogeneidad del manto de nieve. Sin embargo, es sabido que la evolución del manto de nieve es muy diferente entre unas partes de la cuenca y otras, variando sobre todo en función de la altitud y la orientación. Debido a diferencias en el régimen térmico y de insolación, la nieve permanece más tiempo en las zonas altas y en las umbrías por lo que el manto de nieve suele ocupar una porción variable de la cuenca.

Una forma de tratar esta heterogeneidad consiste en dividir la cuenca en varias zonas o sectores buscando la máxima homogeneidad interna y la máxima heterogeneidad entre sectores. Cada zona se simula de forma independiente y se distinguirá de las demás en algún parámetro relacionado con la dinámica del manto de nieve. La necesidad de diferenciar las zonas mediante, al menos, un parámetro es el inconveniente de la sectorización, así el modelo se complica y se hace menos parsimonioso.

La sectorización más sencilla es la que divide la cuenca en 2 zonas, que puede ser suficiente para cuencas pequeñas o medias. Si consideramos que el factor determinante es la altitud, el criterio de máxima homogeneidad interna nos lleva a dividir en dos partes iguales el rango altitudinal de la cuenca. Por ejemplo: para La Jarosa, tendríamos una zona A (de "alta") y una zona B (de "baja") y el límite entre ambas sería, aproximadamente, la curva de nivel de 1450 m, que divide por la mitad el rango altitudinal de la cuenca. Sobre un mapa topográfico se ha estimado que la zona A representa, aproximadamente, el 25 por ciento de la superficie total. Para diferenciar el comportamiento de cada zona se opta por el siguiente criterio:

- a) Para el modelo general se considera un único juego de parámetros, común a ambas zonas.
- b) El régimen térmico de la zona A se caracteriza mediante las temperaturas registradas en la presa, corregidas en un valor constante $CorrT$ (que será negativo, ya que la zona A es más fría). Obsérvese que este criterio es equivalente a utilizar un parámetro T_b distinto para cada zona.

4

Retroalimentación de los modelos continuos

4.1. Planteamiento general

Uno de los objetivos centrales del presente estudio ha sido introducir y ensayar en un modelo continuo la retroalimentación con datos de caudal del pasado inmediato. De este modo se pretende cumplir con el requisito de aprovechar todos los datos relevantes disponibles sin perder las ventajas de los modelos continuos.

En un modelo continuo el caudal simulado de un periodo es una función de las variables de entrada del periodo (P, ETP, T) y del estado de humedad simulado al final del periodo anterior. El error del periodo, diferencia entre el caudal simulado y el caudal observado, puede atribuirse a diversas causas no excluyentes:

- 1) La formulación del modelo no es adecuada para representar el funcionamiento de la cuenca.
- 2) Algunos de los parámetros del modelo no tienen valores adecuados.
- 3) Los datos meteorológicos de entrada (precipitación, temperatura, etc.) no representan bien las condiciones meteorológicas reales.
- 4) El caudal observado difiere del caudal real del periodo, debido a errores de observación.
- 5) El estado de humedad de los almacenamientos del modelo al inicio del intervalo no se corresponde con la realidad de la situación de la cuenca.

Partimos del supuesto de que las causas números (1) a (4) han sido controladas al máximo en los procesos de recopilación y elaboración de datos, selección del modelo y calibración. La única causa de error controlable en este estadio es, por tanto, la (5). Esta causa de error tiene dos características peculiares:

- a) Es consecuencia de la acumulación de errores atribuibles a las causas (2) a (4) en la simulación de periodos anteriores. En efecto, si el modelo representa adecuadamente el funcionamiento de la cuenca y los datos de entrada son correctos, el modelo debería mantener una representación correcta del estado de humedad de la cuenca.
- b) Es causa de errores persistentes. Si, por ejemplo, el estado de humedad de la cuenca al final del día $i-1$ está subestimado, es esperable un error por defecto en la estimación del caudal en el día i . Pero además, también es esperable que resulte estimado por defecto el estado de humedad al final del día i , que se computa a partir del correspondiente al día anterior, de modo que es probable un error del mismo signo en la estimación del caudal del día $i+1$.

La causa de error (a) es la representación del estado de humedad de la cuenca relacionado con los errores en la estimación de caudal de los periodos inmediatamente anteriores. En el caso de (b), está relacionado con los errores en la estimación de caudal de los periodos inmediatamente posteriores. Así pues, es factible mejorar las estimaciones futuras a partir del conocimiento de los errores del pasado inmediato, mediante algún procedimiento de ajuste de la representación del estado de humedad de la cuenca.

La característica (b) además, proporciona un indicador para diagnosticar la importancia de esta componente del error, la autocorrelación en la serie de errores de estimación.

En el presente trabajo se han ensayado con éxito la retroalimentación de los modelos hidrológicos continuos GR4J y GR4JN. En los dos epígrafes siguientes se describe de forma sucinta cómo se ha formulado la retroalimentación de estos modelos.

4.2. Retroalimentación de GR4J

En el modelo GR4J el estado hidrológico al final de un día queda representado por el contenido de humedad de los almacenamientos, S y R, y por los valores de Pr del día en cuestión y los N-1 anteriores, siendo N el primer entero mayor que 2·X4. Por sencillez, y debido a que la mayor parte de Pr está controlada finalmente por el almacenamiento R, el ajuste del estado de humedad de la cuenca se ha limitado a los almacenamientos S y R.

El caudal simulado para el día i-ésimo Qsim_i, se determina a partir de la representación del estado de humedad del día anterior, que hemos reducido al valor del par (S_{i-1}, R_{i-1}). De este modo, se pueden establecer, para cada día, unos valores de sensibilidad de Qsim a S_{i-1} y a R_{i-1}, definidos como el incremento esperable de Qsim_i ante un incremento unitario de S_{i-1} y de R_{i-1} respectivamente. Se trata del concepto de derivada, si bien en este caso conviene referirlo a X1 y X3 respectivamente. Por ejemplo: si X1 = 200 milímetros y X3 = 50 milímetros, un incremento de 10 milímetros es más significativo en R que en S. Así pues, las funciones sS y sR, que representan la sensibilidad del modelo a S y R respectivamente, son:

$$sS = X1 \cdot \frac{\partial Q}{\partial S} \quad [4]$$

$$sR = X3 \cdot \frac{\partial Q}{\partial R} \quad [5]$$

De la ecuación [4] se desprende que una modificación ΔS en el valor de S_{i-1} supone una modificación en el caudal simulado Qsim_i que se puede estimar en:

$$\Delta Qsim_i = sS \cdot \frac{\Delta S}{X1} \quad [6]$$

Análogamente, una modificación ΔR en el valor de R_{i-1} supone una modificación en el caudal simulado Qsim_i que se puede estimar en:

$$\Delta Qsim_i = sR \cdot \frac{\Delta R}{X3} \quad [7]$$

Supongamos que ya se conoce el caudal observado en el día i -ésimo, Q_i , pero aún no son conocidos Q_{i+1} ni los que le siguen. Sabemos cuál ha sido el error de estimación para el día i -ésimo, $Err_i = Q_{sim_i} - Q_i$. Se trata de buscar un estado de humedad razonablemente parecido a (S_{i-1}, R_{i-1}) , que llamaremos "estado de humedad corregido", para el cual se reduzca el error Err_i . Evidentemente, siendo ya conocido Q_i , mejorar su estimación no tiene ninguna relevancia. Sin embargo, se parte de la hipótesis de que corregir (S_{i-1}, R_{i-1}) para reducir Err_i tendrá un efecto positivo en la estimación de los caudales para los días $i+1$ y siguientes.

Para obtener el estado de humedad corregido en $i-1$ se determinan dos correcciones, ΔS y ΔR , a aplicar respectivamente a S_{i-1} y R_{i-1} . El efecto de ΔS , por sí misma, sobre el caudal simulado para i se puede estimar a partir de la ecuación [6]:

$$\Delta Q_{Si} = sS_{i-1} \frac{\Delta S}{X1} \quad [8]$$

Análogamente, el efecto de ΔR sobre Q_{sim_i} se puede estimar a partir de la ecuación [7], resultando:

$$\Delta Q_{Ri} = sR_{i-1} \frac{\Delta R}{X3} \quad [9]$$

Se ha supuesto que la interacción de ambas correcciones es de segundo orden en relación con los efectos de cada una por separado. Por tanto, buscamos unos valores de ΔS y ΔR tales que:

$$\Delta Q_{Si} + \Delta Q_{Ri} = -Err_i \quad [10]$$

Adicionalmente se aplica el siguiente criterio: ΔS_{i-1} y ΔR_{i-1} serán proporcionales a sS y sR , respectivamente. Es el criterio que expresa la ecuación [11]:

$$\frac{\Delta S}{sS_{i-1}} = \frac{\Delta R}{sR_{i-1}} \quad [11]$$

Este último criterio persigue el objetivo de minimizar la modificación de (S_{i-1}, R_{i-1}) cargando el peso de la corrección en la variable cuya modificación es más eficiente.

El conjunto de ecuaciones [8] a [11] permite determinar, en cada caso, el valor del estado de humedad corregido.

Se ha comprobado que la aplicación directa de las correcciones anteriores no produce buenos resultados. Esto se debe principalmente a que en determinadas ocasiones la parte del error atribuible a una mala representación del estado de humedad es pequeña. En estos casos, forzar la corrección del estado de humedad lleva al modelo a una situación no representativa que se traduce, en los días siguientes, en errores de sentido contrario al que ha originado la corrección (efecto rebote).

Para garantizar que las correcciones del estado de humedad se mantienen dentro de un margen tolerable, se ha optado por imponer un límite máximo al valor absoluto de la corrección, expresado como fracción de la capacidad total del almacenamiento. Así, si el valor de esta fracción es r , la corrección de S , ΔS queda restringida al intervalo $[-r \cdot X1, r \cdot X1]$ y la corrección de R queda restringida al intervalo $[-r \cdot X3, r \cdot X3]$.

4.3. Retroalimentación de GR4JN

GR4JN es el modelo hidrológico que resulta de incorporar a GR4J la simulación de nieve, según se ha descrito en el apartado 3.9. En relación con GR4J, GR4JN maneja un almacenamiento de humedad adicional N (el manto de nieve). Dos ejemplos típicos de error asociado al comportamiento de la nieve ilustran el tipo de corrección que puede aplicarse a este almacenamiento:

- a) En un día con precipitación y tiempo frío el modelo ha estimado por exceso el caudal. Es plausible suponer que la cantidad de precipitación que ha caído en forma de nieve acumulable es mayor que la que ha estimado el modelo, o que la fusión de la nieve existente inducida por la precipitación es menor que la que ha estimado el modelo. Por tanto, la acumulación de nieve real es mayor que la que supone el modelo, lo cual se traducirá en una simulación inadecuada de los caudales de días posteriores.
- b) En un día sin precipitación pero con manto de nieve en la cuenca, el modelo ha estimado por exceso el caudal. Es plausible suponer que el modelo ha estimado por exceso la fusión del manto de nieve existente. En estas condiciones, la cantidad de agua almacenada en forma de nieve según el modelo será menor que la real, lo cual introducirá un error en los caudales simulados para los días siguientes.

GR4JN está compuesto por un modelo de manto de nieve y un modelo GR4J convencional en secuencia. La salida del modelo de manto de nieve, que denotaremos Q_N , es la entrada de un modelo GR4J convencional. Q_N es una función de N , P y T donde N es la variable de estado que caracteriza la situación del modelo de manto de nieve y, por tanto, responsable de posibles errores persistentes. P es la entrada del modelo de manto de nieve y T la variable que modula la transformación de la entrada P en la salida Q_N , a través del almacenamiento N . T pretende representar, de forma simplificada, las condiciones ambientales que rigen la dinámica de N .

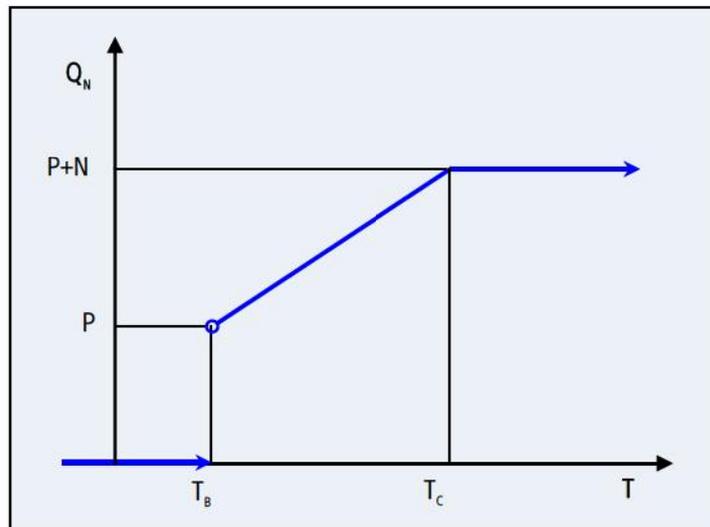
Para unos valores de N y P fijos, la relación entre Q_N y T es creciente (ver figura 5). Por otra parte, la relación entre Q_N y Q , caudal simulado, es creciente. Así pues, considerando un día problema concreto, en determinadas circunstancias puede existir un valor razonablemente próximo a T , T' , que proporciona una estimación mejor del caudal observado. Si se da este caso, la simulación con T' se considerará más adecuada que la simulación con el valor medido de T , y el estado de humedad de la cuenca para la simulación del día siguiente se tomará de la simulación corregida.

La condición de que T' esté razonablemente próximo a T se concreta estableciendo un valor máximo para la diferencia absoluta entre ambas magnitudes, Δ_{\max} . La búsqueda de T' se ha implementado mediante un algoritmo sencillo de rastreo en el intervalo de búsqueda: (si el error en caudal es por exceso, el intervalo es $[T - \Delta_{\max}, T]$; si el error es por defecto sería $[T, T + \Delta_{\max}]$).

La retroalimentación de GR4JN se realiza secuencialmente, en primer lugar se aplica la corrección en T y después, sobre el error residual, la corrección del estado de humedad previo (S y R).

4.4. Eficiencia hidrológica y alcance de predicción

Con un modelo retroalimentado (o con un modelo que admite datos de caudal del pasado inmediato como datos de entrada) se pueden hacer inferencias sobre el caudal del día siguiente al último del que se dispone de datos. O bien, en términos más llanos, se puede predecir el caudal de mañana una vez conocido el de hoy. Diremos que el alcance de esta predicción es de un día, porque esa es la distancia temporal entre el día para el que se predice y el último día con datos.

Figura 5. Relación entre Q_n y T , caso general

¿Podríamos predecir el caudal para pasado mañana?. Aunque en este caso no podemos retroalimentar el modelo con el caudal de mañana, nada impide simular un día más (sin retroalimentación) y obtener una predicción para el caudal de pasado mañana, contando con la corrección del estado de humedad de hoy. En este caso, el alcance de la predicción es de dos días. Es de esperar que la precisión de la predicción sea menor en este caso, aunque sólo sea porque la corrección del estado de humedad en que se apoya es más remota en el tiempo. El proceso puede continuar y podemos realizar predicciones de tres, cuatro, n... días de alcance, aunque, previsiblemente, disminuirá la precisión a medida que aumenta el alcance.

Evidentemente, la predicción de caudal depende no sólo del modelo sino de las predicciones disponibles para las variables meteorológicas relevantes (precipitación y ETP en este caso). La incertidumbre asociada a este tipo de predicción de caudal tiene, por tanto, dos componentes: la derivada de la precisión del modelo hidrológico y la derivada de la precisión de las predicciones meteorológicas (que, como es lógico, también disminuye con el alcance). En este trabajo, en el que tratamos de evaluar la capacidad de varios modelos hidrológicos, interesa la componente **hidrológica** de la incertidumbre. Para ello, se ha estudiado el comportamiento de los modelos retroalimentados para distintos alcances **suponiendo conocidos los datos meteorológicos**.

Así, cuando en relación con un modelo retroalimentado hablemos de la eficiencia hidrológica para un alcance de predicción de tres días (o **D+3**) nos estaremos refiriendo a la eficiencia con que dicho modelo estima los caudales diarios, supuesto que se conocen los datos meteorológicos hasta el mismo día de la estimación y los de caudal hasta la fecha anterior en tres días al de la estimación.

Por otra parte, hemos llamado funcionamiento **libre** de un modelo hidrológico al funcionamiento no retroalimentado, esto es, sin información sobre datos de caudales anteriores al que se estima, pero con datos meteorológicos conocidos.

5

Desarrollo y selección del modelo

Las estrategias de modelización descritas hasta ahora, incluida la retroalimentación de errores en los modelos continuos, son las que han configurado el proceso de desarrollo y selección del modelo hidrológico propuesto. Dicho proceso, que ha consistido en una secuencia de ensayos de simulación de aportaciones, evaluación de resultados y planteamiento de nuevos ensayos, se describe de forma sucinta en los epígrafes siguientes.

5.1. Modelos continuos sin simulación de nieve

La cuenca del embalse de Pedrezuela se ha seleccionado, como primer caso de prueba, por ser entre las cuencas de embalses de Canal de Isabel II, una de las que presenta una hidrología menos influenciada por los fenómenos asociados al manto de nieve. Los ensayos realizados en esta primera aproximación prescinden de la simulación de los fenómenos asociados a la nieve, de manera que se rebaja el nivel de complejidad del problema.

Las tres formulaciones de modelos continuos descritas en los epígrafes 3.2 a 3.4 (GR4J, SIMHYD y SIMHYD modificado) se han ajustado a la serie de aportaciones diarias al embalse de Pedrezuela.

En las tablas 2 y 3 se recogen los valores de los estadísticos de ajuste para la calibración y la validación de los modelos. La calibración se realiza buscando la combinación de valores de los parámetros que minimice el error cuadrático medio. Como ya se ha indicado, el desarrollo de SIMHYD modificado se debe al relativamente pobre resultado de calibración obtenido con SIMHYD, para el cual, ni siquiera se han determinado los estadísticos de ajuste de validación.

Tabla 2. Estadísticos de ajuste de calibración de los modelos continuos a las aportaciones diarias de Pedrezuela

Estadístico	Unidad	GR4J	SIMHYD	SIMHYDmod
Error medio	m ³ /s	0,008	-0,05	0,010
	%	0,560	3,930	0,640
Error estándar	m ³ /s	1,492	1,848	1,647
r ²		0,855	0,777	0,823
Coefficiente de eficiencia		0,854	0,776	0,823
Autocorrelación errores		0,511	0,542	0,470

Tabla 3. Estadísticos de ajuste de validación de los modelos continuos a las aportaciones diarias de Pedrezuela

Estadístico	Unidad	GR4J	SIMHYDmod
Error medio	m ³ /s	0,470	0,500
	%	29,500	31,100
Error estándar	m ³ /s	2,110	2,091
r ²		0,802	0,806
Coefficiente de eficiencia		0,580	0,587
Autocorrelación errores		0,670	0,730

El funcionamiento del modelo **SIMHYDmod** mejora notablemente el de **SIMHYD** y alcanza un nivel equiparable al del modelo **GR4J**. La formulación de **SIMHYDmod** es original, aunque se basa en la modificación de un modelo existente, no se ha ensayado más que en este caso.

Por otra parte, el juego de parámetros de **GR4J** (cuatro en total) es más eficiente que el de **SIMHYDmod** (seis parámetros). Por tales motivos, y dado que **SIMHYDmod** no aporta ninguna mejora a los resultados de **GR4J**, se preferirá este último como modelo continuo para avanzar en la investigación.

De hecho, el modelo **GR4J** responde sorprendentemente bien a la calibración, teniendo en cuenta que dispone únicamente de cuatro parámetros y que, sólo ha sido necesario calibrar 3 de ellos, (a priori se ha fijado $X2 = 0$). El coeficiente de eficiencia alcanzado en calibración supera el 85 por ciento. Las figuras 6 y 7 muestran las series diarias de un semestre del periodo de calibración y validación, respectivamente, incluyendo el caudal estimado por **GR4J**.

Figura 6. Pedrezuela GR4J, semestre de calibración 1/10/95 a 1/4/96

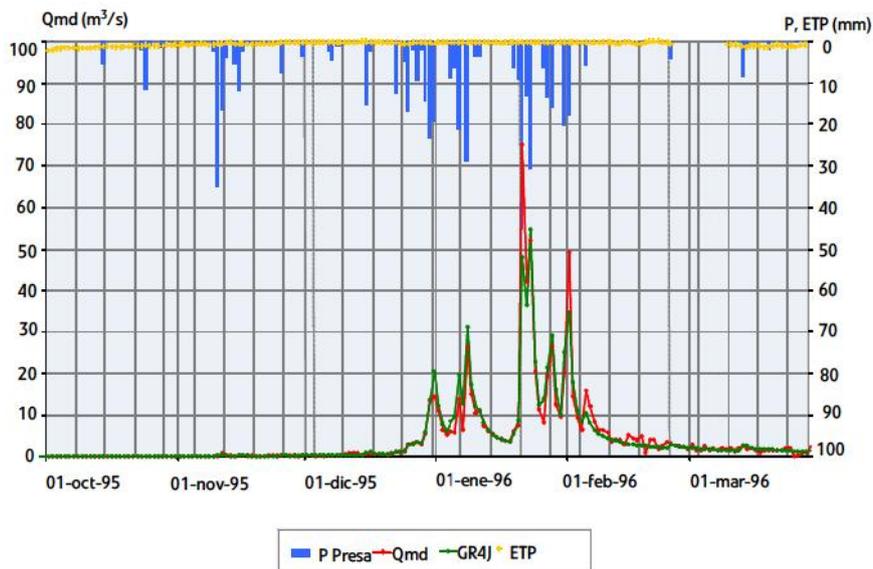
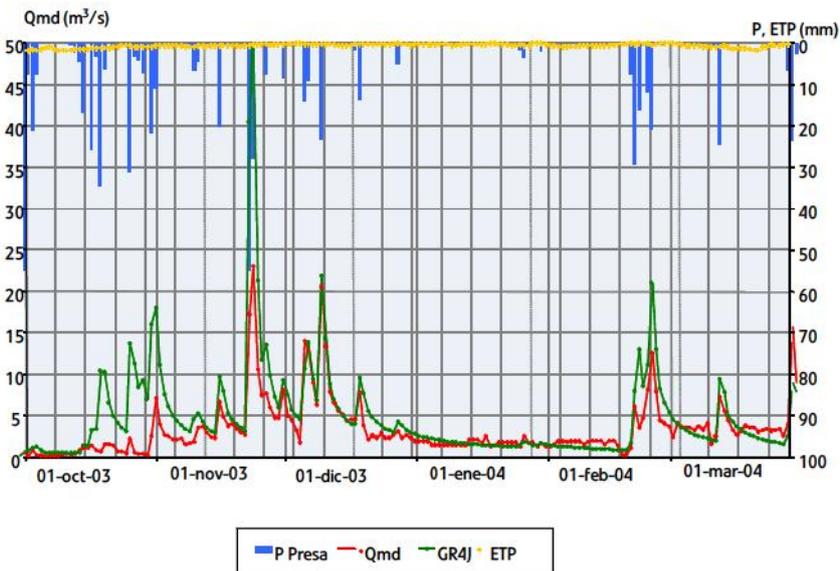


Figura 7. Pedrezuela GR4J, semestre de validación 1/10/03 a 1/4/04



Conviene señalar, sin embargo, que tanto en **GR4J** como en **SIMHYDmod** se aprecia una brecha notable entre los resultados obtenidos en validación y los que proporciona la calibración. En ambos casos, la pérdida de eficiencia en validación se puede atribuir a una marcada tendencia a estimar por exceso los caudales del periodo de validación, (error medio del orden del 30 por ciento). No se ha encontrado una explicación plausible para este empeoramiento de la eficiencia del modelo en la validación.

5.2. Retroalimentación en GR4J

La retroalimentación de errores en **GR4J** (según la formulación descrita en el epígrafe 4.2) se ha ensayado con éxito para el modelo ajustado a las aportaciones de Pedrezuela.

El valor de r , límite para la corrección del estado de humedad, se ha establecido inicialmente en 0,05 (es decir, la corrección máxima es de un 5 por ciento de la capacidad del almacenamiento) lo que proporciona el mejor resultado en eficiencia hidrológica para alcance de un día.

En la tabla 4 se presentan los coeficientes de eficiencia hidrológica para alcances de uno a diez días que se obtienen para calibración y validación. Como referencia, en la última fila se recogen los coeficientes de eficiencia del modelo en funcionamiento libre, que son los que se obtuvieron en el ajuste del modelo antes de aplicar la retroalimentación. La figura 8 presenta estos mismos resultados gráficamente.

El efecto de la retroalimentación es muy acusado en los alcances de predicción cortos. Para alcance de un día (**D+1**) la eficiencia en calibración se aproxima al 90 por ciento, y en validación supera claramente el 80 por ciento. De hecho, el modelo retroalimentado exhibe un funcionamiento bastante bueno para alcance de un día (ver figura 9), corrigiendo claramente la tendencia a sobrestimar que se observa para el funcionamiento libre.

Aunque este efecto se disipa rápidamente a medida que se consideran alcances de predicción mayores (para **D+4**, la eficiencia en validación queda por debajo del 70 por ciento), la mejora respecto del comportamiento en funcionamiento libre es claramente apreciable incluso para **D+10**.

Tabla 4. Coeficientes de eficiencia hidrológica en función del alcance

Alcance (días)	Coeficiente de eficiencia	
	Calibración	Validación
1	0,892	0,829
2	0,887	0,740
3	0,882	0,716
4	0,876	0,695
5	0,871	0,682
6	0,868	0,681
7	0,864	0,673
8	0,860	0,656
9	0,858	0,641
10	0,858	0,639
Libre	0,854	0,580

Figura 8. Capacidad de predicción en Pedrezuela modelo GR4J_rSR

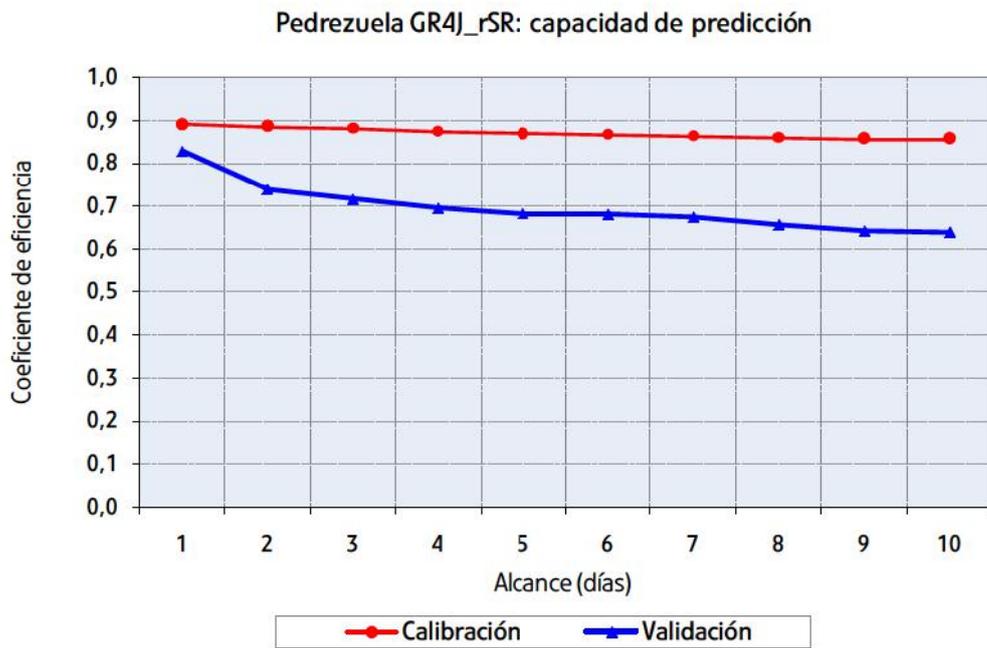
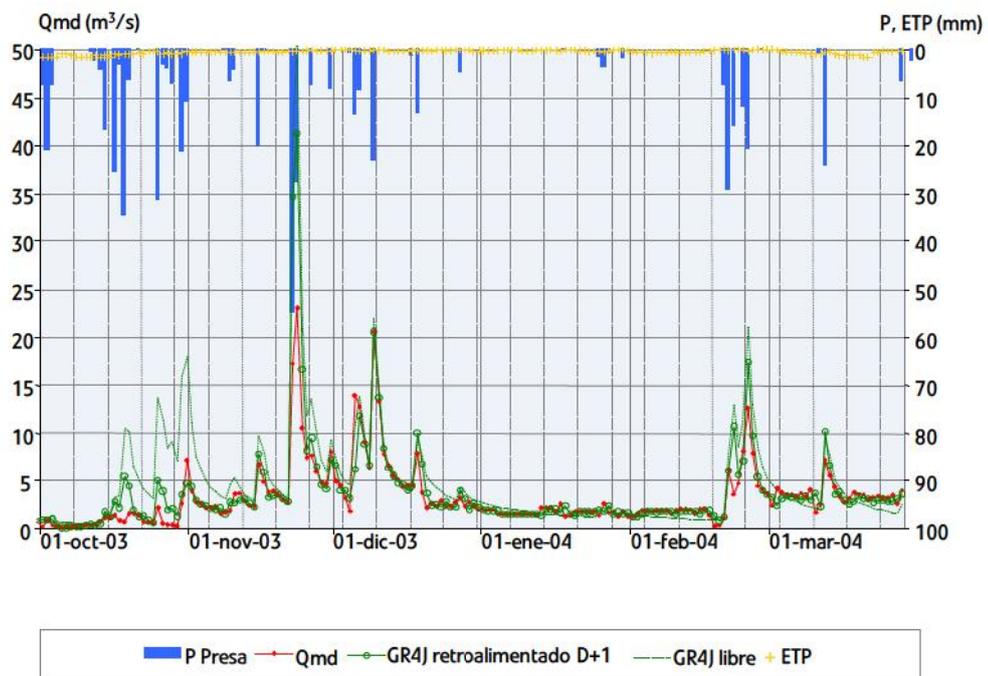


Figura 9. Pedrezuela modelo GR4J



5.3. Comparación con otras estrategias

5.3.1. Modelos de regresión

Las tablas 5 y 6 proporcionan los resultados del ajuste correspondiente a la formulación [2] presentada en el epígrafe 3, y que ha sido adoptada como modelo referencia de la aplicación de regresión lineal para la predicción de caudales.

El hecho de que todos los coeficientes del modelo resulten positivos tiene el efecto deseable de evitar caudales estimados negativos. Con todo, la presencia de un término independiente no nulo introduce cierta inconsistencia conceptual: incluso en tiempo completamente seco y con caudales previos nulos el modelo estima un caudal positivo.

Los modelos de regresión analizados se pueden considerar retroalimentados por naturaleza en la medida en que incorporan datos de caudal pasado como variables de entrada. En este sentido, los estadísticos de ajuste de la tabla 6 deben interpretarse como medidas de la eficiencia hidrológica para alcance de un día.

Tabla 5. Resultados para la regresión [2]

	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
Coefficientes	0,1243	0,0222	0,4214	0,0118	0,2244	0,0304	0,0958
Error típico	0,0263	0,0078	0,0119	0,0010	0,0135	0,0015	0,0049
Estadístico t	4,7286	2,8310	35,5324	11,4360	16,5931	19,8875	19,5170
Significación p	0,0000	0,0047	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Coefficiente estándar		0,0267	0,5068	0,1324	0,1805	0,2146	0,1992
% coeficiente estándar		2,1	40,2	10,5	14,3	17,0	15,8

Tabla 6. Resultados de ajuste para el modelo de regresión [2]

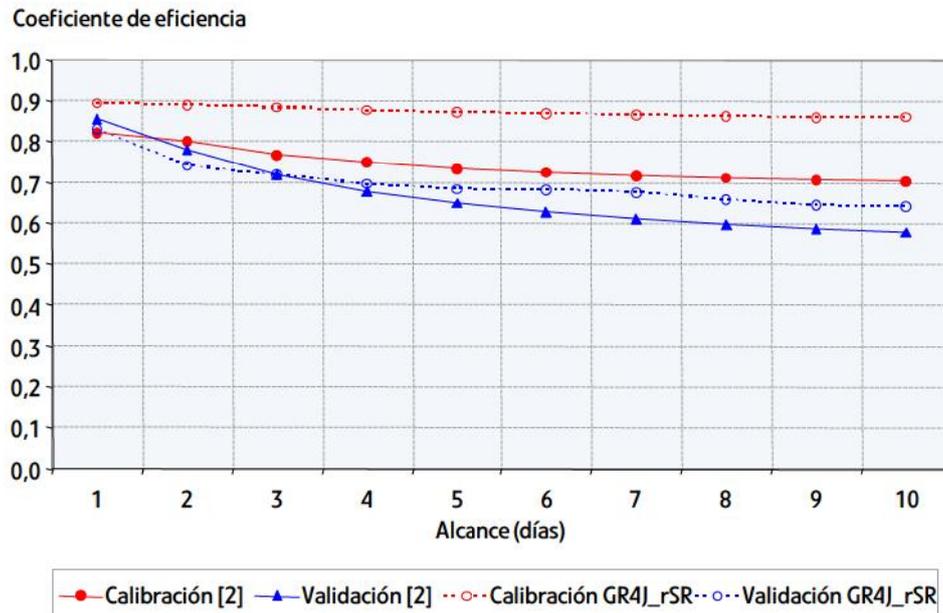
Estadístico	Unidad	Calibración	Validación
Error medio	m^3/s	0,0	0,01
	%	0,0	0,89
Error estándar	m^3/s	1,658	1,244
r^2		0,820	0,856
Coefficiente de eficiencia		0,820	0,854
Autocorrelación errores		-0,148	0,116

Los coeficientes de eficiencia, por tanto, pueden compararse con los estadísticos de la primera fila de la tabla 4, correspondientes a GR4) retroalimentado. De esta comparación se desprende que el comportamiento del modelo de regresión es aproximadamente igual de eficiente que el de GR4) retroalimentado en el horizonte $D+1$.

La figura 10 presenta la variación de los coeficientes de eficiencia hidrológica en función del alcance de la predicción para el modelo de regresión [2] y, para su comparación, GR4) retroalimentado. Se comprueba que, en calibración, GR4) supera al modelo de regresión en todos los alcances y que en validación, el modelo de regresión sólo presenta una ligera ventaja en los alcances de uno y dos días.

Se puede concluir que la estrategia de regresión no supera al modelo continuo adoptado.

Figura 10. Pedrezuela regresión: capacidad de predicción



5.3.2. Qb+Qf

La aplicación del modelo Qb+Qf a las aportaciones diarias de Pedrezuela ha seguido dos fases:

1. Calibración del modelo en funcionamiento libre.
2. Análisis del comportamiento, en funcionamiento libre y en funcionamiento retroalimentado.

De este modo, las condiciones de calibración son equivalentes a las de un modelo continuo de balance y los resultados de eficiencia hidrológica son perfectamente comparables.

Los estadísticos de ajuste de calibración y validación en funcionamiento libre se presentan en las tablas 7 y 8. Son valores que pueden considerarse aceptables, aunque peores que los que proporcionan, en las mismas condiciones, los modelos continuos ensayados.

Tabla 7. Resultados de ajuste de calibración del modelo Qb+Qf

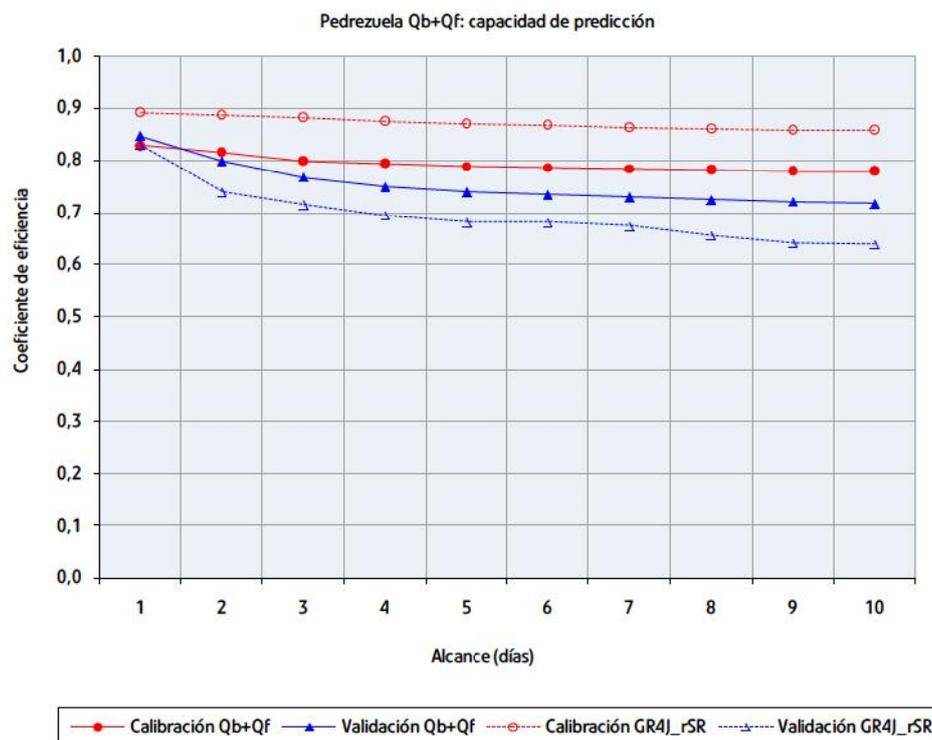
Estadístico	Unidad	Valor
Error medio	m ³ /s	-0,11
	%	-7,74
Error estándar	m ³ /s	1,879
r ²		0,773
Coeficiente de eficiencia		0,769
Autocorrelación errores		0,495

Tabla 8. Resultados de ajuste de validación del modelo Qb+Qf

Estadístico	Unidad	Valor
Error medio	m ³ /s	0,21
	%	12,88
Error estándar	m ³ /s	1,892
r ²		0,754
Coefficiente de eficiencia		0,662
Autocorrelación errores		0,689

Los valores de los coeficientes de eficiencia hidrológica en función del alcance de la predicción (funcionamiento retroalimentado) se presentan en la figura 11, donde también se muestran los correspondientes a GR4J retroalimentado para su comparación.

Figura 11. Pedrezuela modelo Qb+Qf



Aparentemente, en la aplicación operativa, el modelo Qb+Qf podría competir con el modelo continuo GR4J. Tiene además la ventaja de que la retroalimentación con caudales está incorporada de forma natural en su formulación. Sin embargo, Qb+Qf presenta ciertas desventajas:

- Aunque el resultado en coeficiente de eficiencia es bastante bueno, la calibración de Qb+Qf no logra un buen ajuste del error medio (-7,74 por ciento, ver tabla 7).
- La formulación Qb+Qf es enteramente original y, por tanto, no ha sido ensayada en ningún otro caso.
- A priori, la incorporación de la simulación de la nieve a un modelo de tipo métrico parece poco fiable.

5.3.3. Conclusión

Los resultados obtenidos con las dos estrategias de modelización alternativas ensayadas no proporcionan ninguna evidencia de que estas sean preferibles al modelo continuo GR4J. Más bien al contrario, aparece este modelo retroalimentado como la mejor de las opciones ensayadas para la simulación operativa de aportaciones diarias. Por tanto, se ha adoptado el modelo GR4J retroalimentado para continuar con la investigación.

5.4. Incorporación de la simulación de nieve

5.4.1. Funcionamiento libre

La combinación de GR4J y la formulación para la simulación de nieve presentada en el apartado 3.6 constituyen el modelo hidrológico continuo adoptado para la investigación, que se ha denominado GR4JN. Este modelo se ha probado, en primer lugar, con la serie de aportaciones a la cuenca de La Jarosa.

Se han ensayado dos formulaciones, que se han denominado GR4JN_1 y GR4JN_2. La primera de ellas aplica un modelo de zona única y la segunda, en cambio, utiliza una sectorización de la cuenca en 2 zonas, según los criterios descritos en el apartado 3.6.4. Además, se ha ajustado el modelo GR4J sin nieve al mismo juego de datos, para utilizarlo como referencia.

Las tablas 9 y 10 presentan los resultados de los ajustes de los tres modelos, para calibración y validación. Se comprueba que la introducción de la simulación de la nieve produce una mejora de la precisión del modelo, si bien esta es poco significativa. En el mejor de los casos, se pasa del 79,8 por ciento al 80,9 por ciento de eficiencia en calibración, a costa de añadir cuatro parámetros al modelo.

Tabla 9. Estadísticos de ajuste de calibración de los modelos

Estadístico	Unidad	GR4J	GR4JN_1	GR4JN_2
Error medio	m ³ /s	0,022	0,023	0,023
	%	6,64	6,960	7,130
Error estándar	m ³ /s	0,354	0,349	0,344
r ²		0,799	0,804	0,811
Coefficiente de eficiencia		0,798	0,803	0,809
Autocorrelación errores		0,616	0,611	0,601

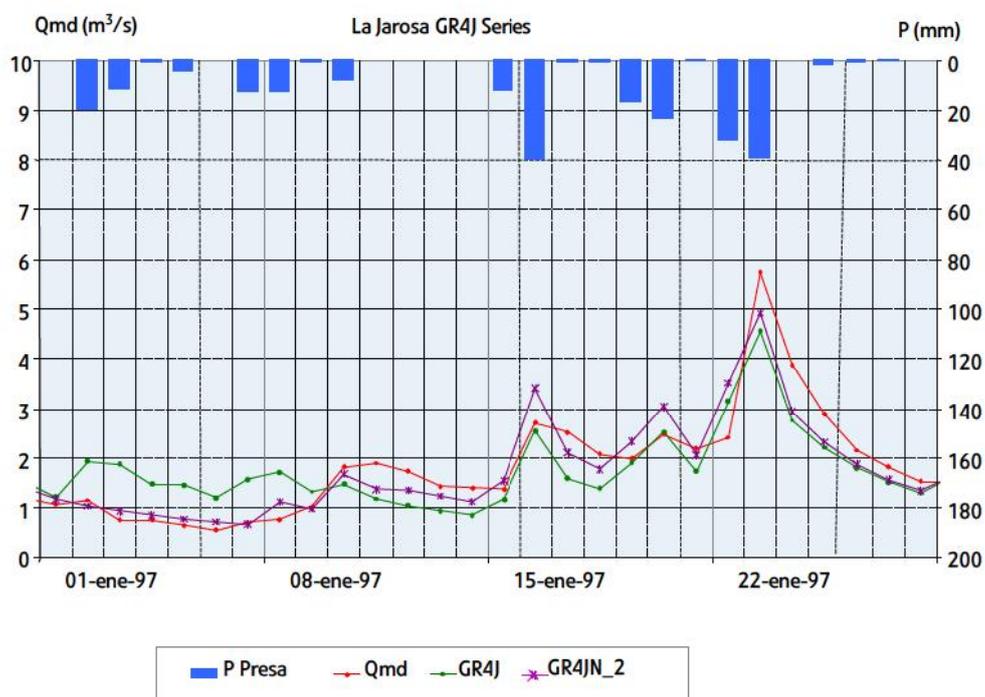
Tabla 10. Estadísticos de ajuste de validación de los modelos

Estadístico	Unidad	GR4J	GR4JN_1	GR4JN_2
Error medio	m ³ /s	-0,023	-0,023	-0,023
	%	-7,980	-7,910	-7,800
Error estándar	m ³ /s	0,243	0,242	0,240
r ²		0,767	0,768	0,772
Coefficiente de eficiencia		0,754	0,755	0,759
Autocorrelación errores		0,624	0,620	0,616

Aunque las diferencias en el grado de ajuste son pequeñas, se preferirá el modelo **GR4JN_2** que, además de presentar un ajuste ligeramente mejor, resulta más convincente desde el punto de vista conceptual.

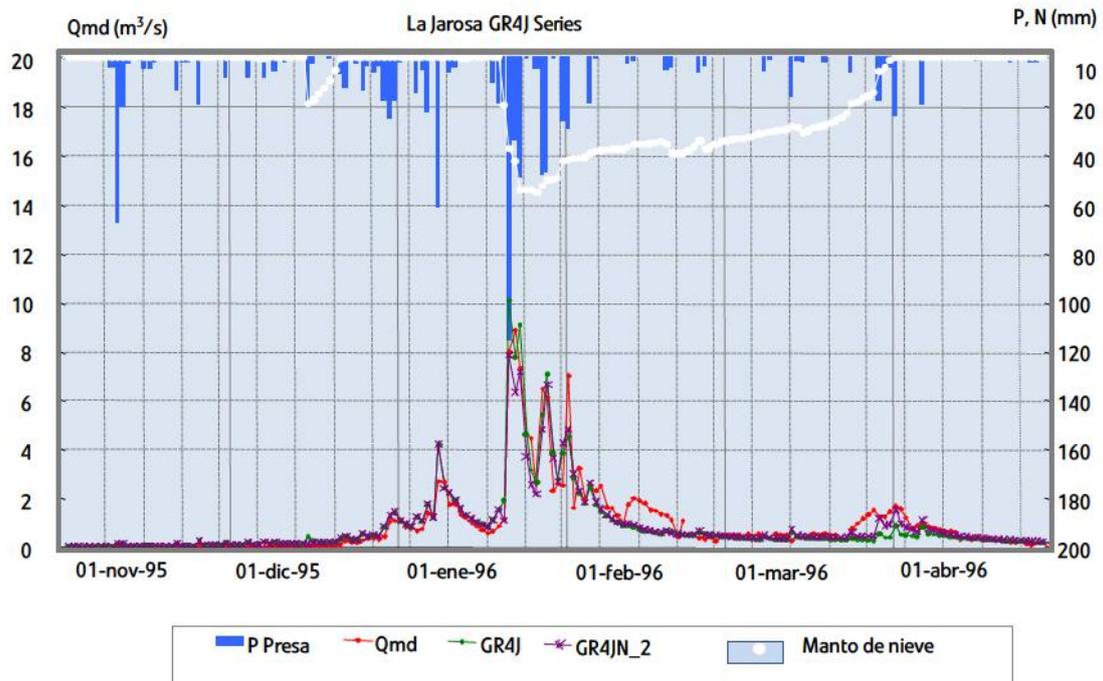
La figura 12 refleja el comportamiento de **GR4JN** en el caso descrito en el apartado 3.6.2 (ver figura 4). Tanto en los caudales observados, como en los simulados, la respuesta a las precipitaciones de los días 2 a 8 de enero de 1997 se manifiesta con retraso, tanto en los caudales observados como en los simulados por **GR4JN**, aunque el grado de ajuste diste bastante de ser perfecto.

Figura 12. La Jarosa modelo GR4jN



La figura 13 ilustra la evolución de la nieve acumulada en la cuenca, según el modelo, durante el invierno de 1995-96. Conviene advertir que este invierno resultó excepcional en relación con la cantidad y persistencia de la nieve simulada. Por lo general, la incidencia de la nieve en las aportaciones simuladas por **GR4JN** para La Jarosa resulta bastante reducida.

Figura 13. La Jarosa modelo GR4jN, nieve acumulada invierno 1995-96



5.4.2. Retroalimentación

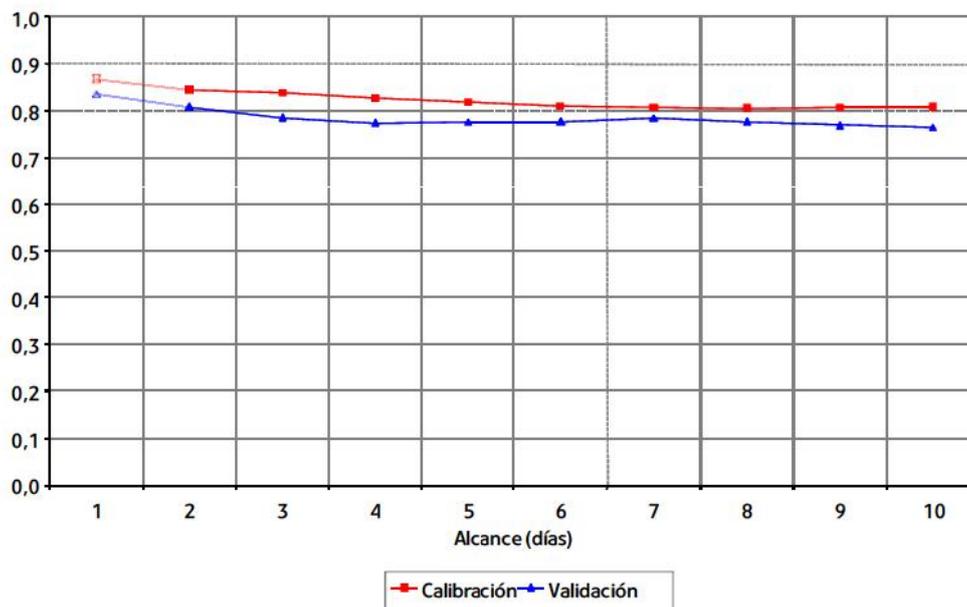
La tabla 11 y la figura 14 presentan la variación del coeficiente de eficiencia en función del alcance de predicción del modelo GR4jN_2 retroalimentado en T, S y R (ver apartado 4.3). Se presentan también los coeficientes de eficiencia del modelo libre GR4jN_2, como referencia.

Se comprueba que, en este caso, el efecto de la retroalimentación se amortigua rápidamente en los primeros 4 alcances, tanto en calibración como en validación y deja de ser significativo a partir de 5 días de alcance.

Tabla 11. Coeficientes de eficiencia en función del alcance

Alcance (días)	Coeficiente de eficiencia	
	Calibración	Validación
1	0,869	0,835
2	0,845	0,808
3	0,838	0,785
4	0,827	0,774
5	0,818	0,776
6	0,810	0,777
7	0,807	0,785
8	0,805	0,777
9	0,807	0,769
10	0,809	0,765
Libre	0,809	0,759

Figura 14. La Jarosa GR4JN_rTSR: Capacidad de predicción



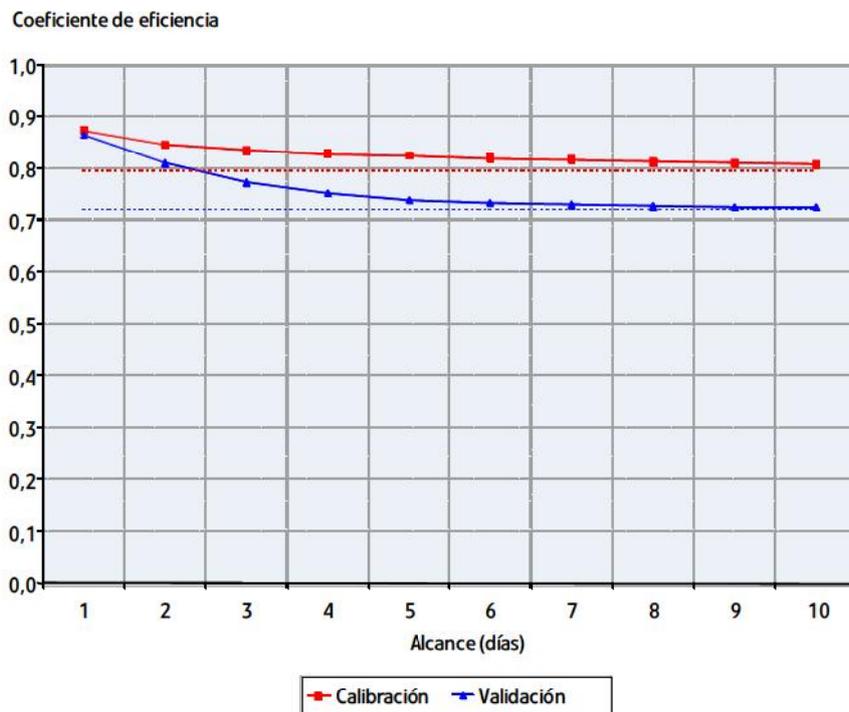
5.4.3. Ensayo para la cuenca de El Vado

El modelo GR4JN se ha ensayado con las aportaciones diarias de la cuenca de El Vado. La tabla 12 y la figura 15 muestran los coeficientes de eficiencia hidrológica del modelo en función del alcance de predicción.

Tabla 12. Eficiencia hidrológica del modelo de El Vado

Alcance (días)	Coeficiente de eficiencia	
	Calibración	Validación
1	0,873	0,864
2	0,845	0,809
3	0,834	0,772
4	0,827	0,751
5	0,824	0,737
6	0,819	0,732
7	0,816	0,728
8	0,812	0,725
9	0,809	0,724
10	0,806	0,724
Libre	0,796	0,719

Figura 15. El Vado GR4JN_rTSR: Capacidad de predicción



5.5. Conclusión

El modelo que se adopta para la simulación operativa de aportaciones en las cuencas de los embalses de Canal de Isabel II es GR4JN, con sectorización en dos zonas y retroalimentación en T, S, y R.

Este modelo se ha ajustado a las aportaciones diarias de las tres cuencas seleccionadas para el estudio piloto, adoptando los siguientes criterios:

- Calibración de parámetros en funcionamiento libre (periodo desde 1/10/1986 hasta 30/9/2000).
- Límite para la retroalimentación en S y R: $r = 3$ por ciento.
- Límite para la retroalimentación en T: $\Delta_{max} = 1,0$ grados Celsius.

El valor adoptado para r (3 %), difiere del ensayo inicialmente para Pedrezuela y La Jarosa (5 %). En el estudio de El Vado se comprobó que un valor más moderado proporciona mejores resultados en el conjunto de alcances de predicción.

En los tres casos, el modelo proporciona resultados satisfactorios, con eficiencia hidrológica en validación en el entorno del 85 por ciento, para alcance de un día.

6

Aplicación operativa

6.1. Información operativa proporcionada por el modelo

Como respuesta a la pregunta planteada en la introducción: "¿Se puede obtener información sobre las aportaciones de los próximos días mediante modelos hidrológicos?"

Seguidamente se presenta un conjunto de resultados que se pueden obtener en el funcionamiento operativo de los modelos que se han ajustado.

Todos los ejemplos se refieren al modelo de la cuenca de El Vado.

6.1.1. Estado de humedad de la cuenca

El modelo se basa en el mantenimiento de un balance diario de humedad en la cuenca que, esencialmente, tiene tres componentes:

- manto de nieve (**N**),
- almacenamiento de producción (**S**) y
- almacenamiento de transporte (**R**).

El conjunto de los tres valores **N**, **R** y **S** al final de cada día es, por tanto, la referencia del estado de humedad de la cuenca que proporciona el modelo.

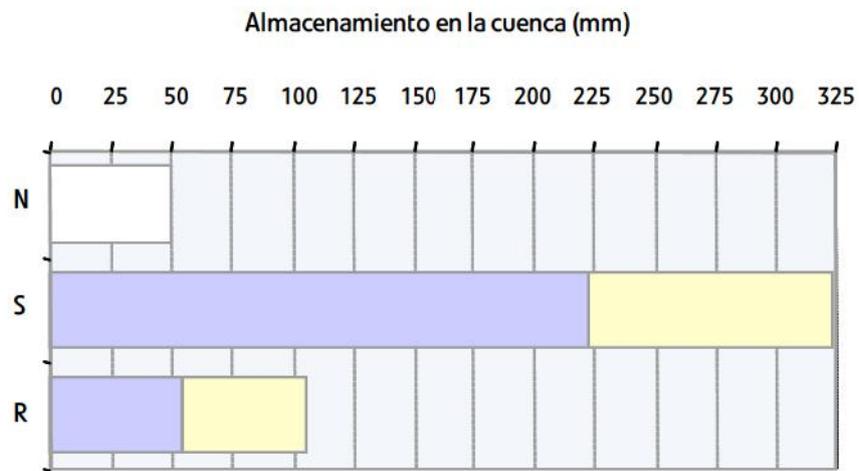
Se presentan 3 ejemplos gráficos del estado de humedad de la cuenca simulado por el modelo, figuras 16,17 y 18.

El gráfico de la figura 16 se corresponde con una situación de invierno húmedo, con una considerable acumulación de nieve en la cuenca y almacenamientos **S** y **R** relativamente llenos.

El gráfico de la figura 17, en cambio, presenta una situación típica de final de estiaje, con los almacenamientos de la cuenca prácticamente vacíos

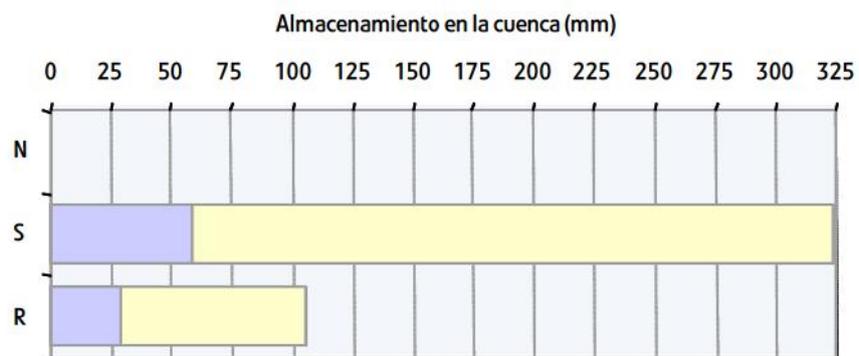
Esta situación cambia drásticamente en 10 días de precipitación excepcional, dando lugar a la situación que refleja el gráfico de la figura 18.

Figura 16. Estado de la cuenca El Vado al final del día 26/2/2006



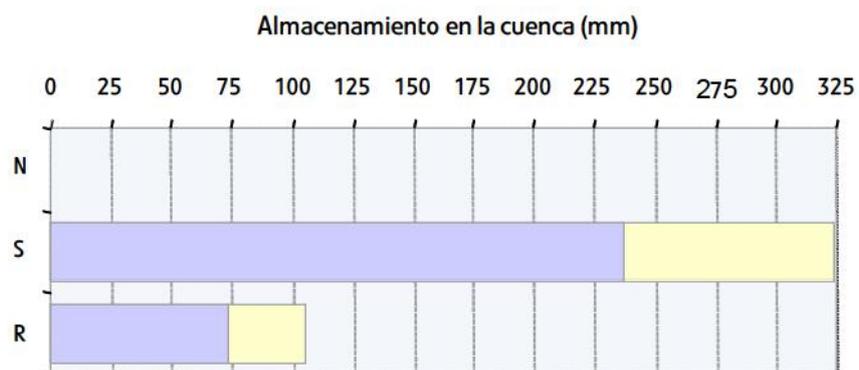
N: Manto de nieve S: Almacenamiento de producción R: Almacenamiento de transporte

Figura 17. Estado de la cuenca El Vado al final del día 15/10/2006



N: Manto de nieve S: Almacenamiento de producción R: Almacenamiento de transporte

Figura 18. Estado de la cuenca El Vado al final del día 25/10/2006



N: Manto de nieve S: Almacenamiento de producción R: Almacenamiento de transporte

6.1.2. Aportación latente

El agua contenida en los almacenamientos de humedad de la cuenca está destinada en parte a escurrir, contribuyendo a la aportación de la cuenca. Así pues, la humedad actual de la cuenca constituye por sí sola una fuente de aportación futura, la cual no depende de nuevas entradas de agua por precipitación. Se ha denominado "aportación latente" a la que puede esperarse en un intervalo de tiempo futuro, incluso si no se producen precipitaciones.

El modelo permite estimar la **aportación latente** para el periodo de n días siguientes al día 0 (último día con dato de caudal). Para ello, basta simular los caudales de esos n días, en el supuesto de tiempo seco durante todos ellos.

Las figuras 19 y 20 muestran sendos ejemplos.

La **aportación latente** para el 15/10/2006 presenta valores muy bajos, propios de la situación de final de estiaje. Tras 10 días excepcionalmente lluviosos, la **aportación latente** aumenta hasta valores próximos a los 16 hectómetros cúbicos en un mes.

Figura 19. Aportación latente a partir del día 15/10/2006

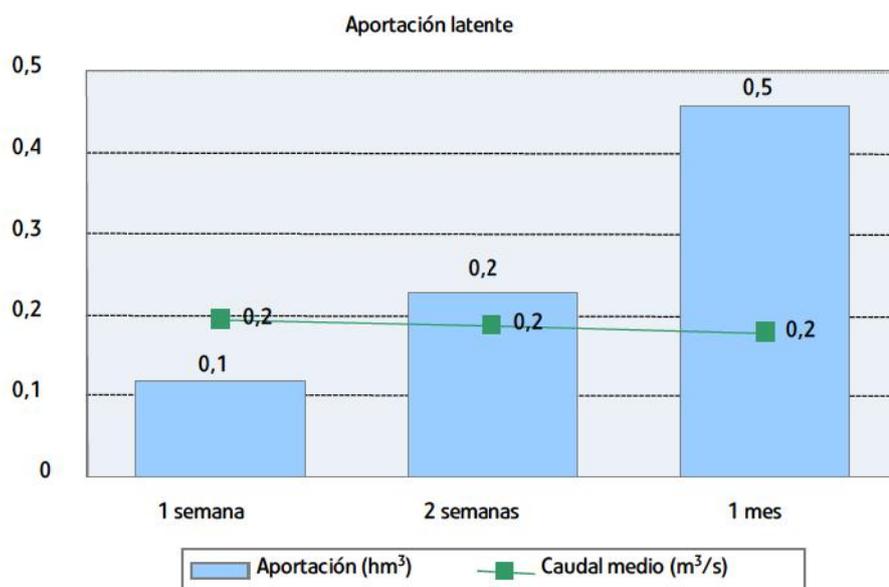
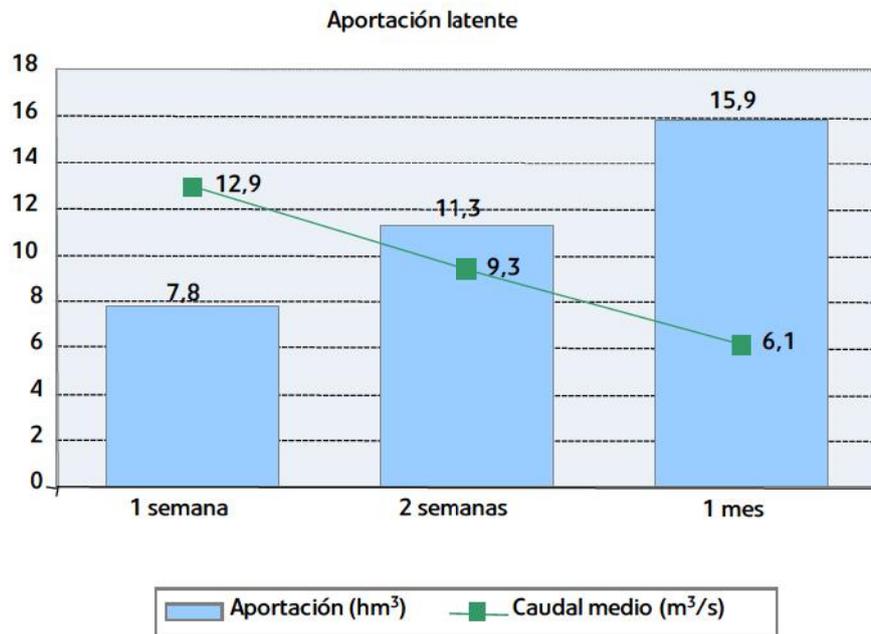


Figura 20. Aportación latente a partir del día 25/10/2006



6.1.3. Respuesta precipitación - caudal

El estado de humedad de la cuenca determina la respuesta en caudal a la precipitación. Sobre una cuenca seca, una precipitación apreciable puede no generar apenas escorrentía directa y, por tanto, no se dejará sentir en los caudales inmediatamente posteriores al aguacero. En cambio, con la cuenca cargada de humedad, la capacidad de infiltración puede ser mucho menor, de modo que la misma precipitación se note claramente en el caudal del mismo día.

La relación entre precipitación y caudal, para un día concreto, tiene un claro interés operativo, ya que permite evaluar cuán esperable es una avenida importante el día en cuestión. Se ha diseñado un procedimiento que permite estimar dicha relación, para el día inmediatamente posterior al día 0, a partir del estado de humedad al final de ese día y escenarios meteorológicos extraídos del banco de datos. Los resultados se presentan mediante gráficos de dispersión en las Figuras 21 y 22.

El aspecto errático del gráfico de la figura 22 es habitual en los meses fríos y refleja la dispersión de la respuesta de la cuenca en función de que haya acumulación o fusión de nieve.

Figura 21. Relación precipitación-caudal para el día 26/10/2006, (día 0: 25/10/2006)

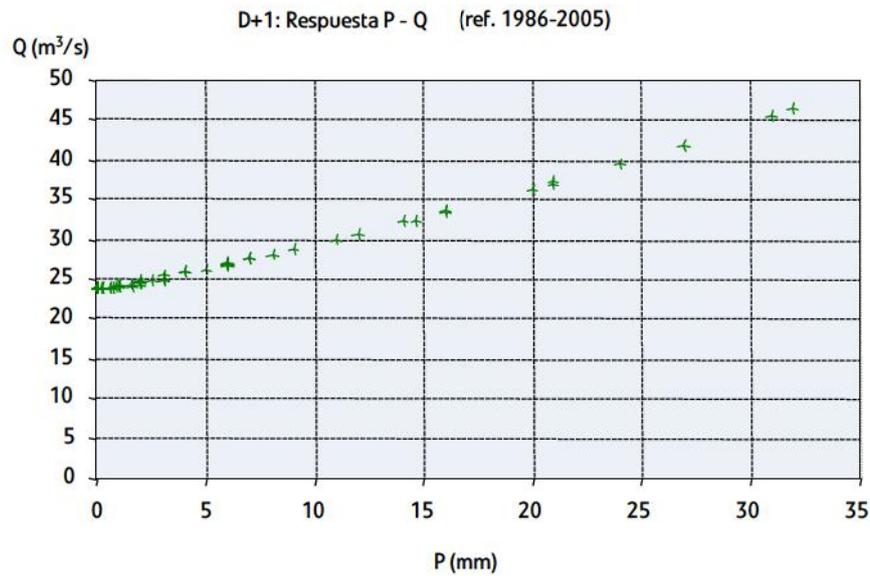
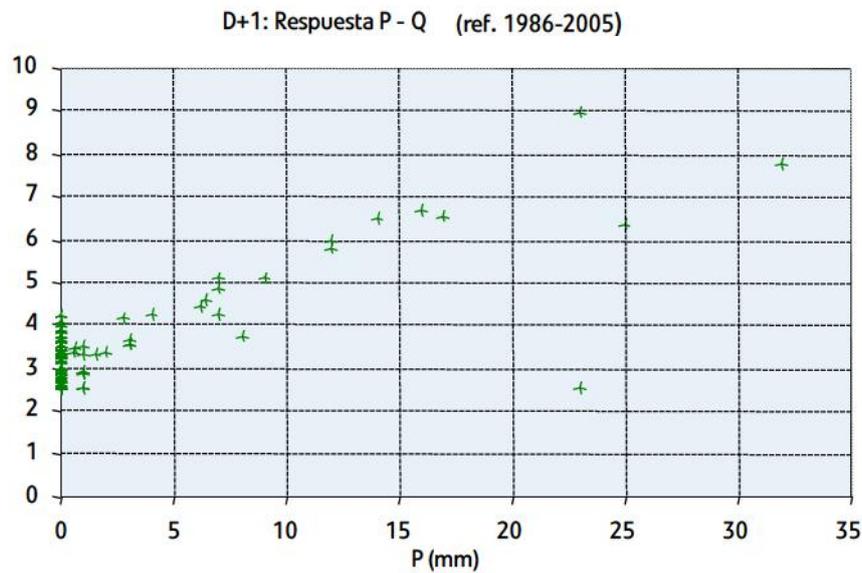


Figura 22. Relación precipitación-caudal para el día 26/2/2006, (día 0: 25/2/2006)



6.1.4. Aportación esperada

La aportación de la cuenca para hoy y los próximos días es función del estado de humedad de la cuenca al final del día de ayer y de las precipitaciones que se produzcan en esos días, además de otras condiciones ambientales.

El modelo proporciona una estimación para el estado de humedad de la cuenca pero los valores futuros para las variables ambientales son, en general, desconocidos.

El banco de datos disponible, sin embargo, proporciona una estadística de las situaciones ambientales esperables en cada época del año.

Supongamos que deseamos estimar las aportaciones para un periodo de 7 días de hoy en adelante (los datos de ayer se suponen conocidos). El siguiente proceso se ha implementado para generar una predicción estadística de aportaciones:

1. Se obtiene del banco de datos el conjunto de periodos de 7 días situados en una época del año similar a la del periodo problema.
2. Para cada uno de los periodos se realiza una simulación partiendo del estado de humedad de ayer. Cada una proporciona unos caudales simulados. En conjunto, se obtiene una muestra de la variable aportación esperada para el periodo problema.
3. Sobre la muestra se realizan estadísticas: media, mediana, percentiles, etc.

Los gráficos de las figuras 23 y 24 son un ejemplo de los resultados que se obtienen para la estimación estadística de aportaciones, para los días siguientes al 15/03/2006.

En las figuras 23 y 24, cada serie representa un percentil y une los valores acumulados para los 7 días, a partir de hoy. Así, la línea de percentil 75 representa los valores de aportación acumulada, o de caudal medio para 1, 2, 3, ... días a partir de hoy, a los que se atribuye una probabilidad de no ser superados del 75 por ciento.

Adicionalmente, se presentan los datos observados de aportación acumulada o caudal medio, conocidos en el caso del ejemplo. Las aportaciones observadas son excepcionalmente altas en relación con los valores esperables según la estimación. La explicación reside en la presentación de unas precipitaciones, también excepcionalmente altas, como se aprecia en el gráfico de la figura 25.

Figura 23. Aportación acumulada esperada a partir del 15/3/2006
(Las cruces representan los datos observados)

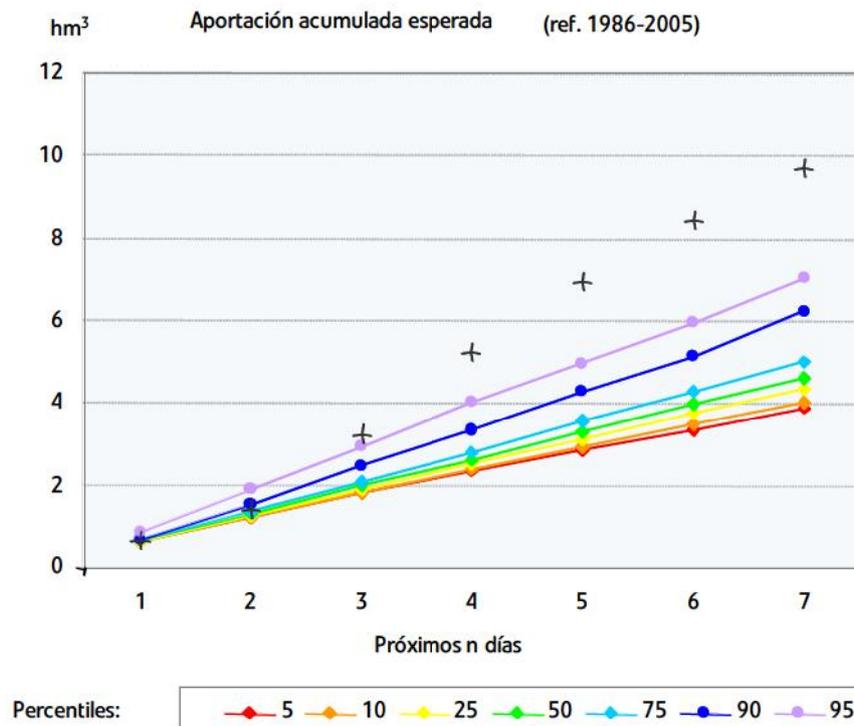


Figura 24. Caudal medio esperado a partir del 15/3/2006
(Las cruces representan los datos observados)

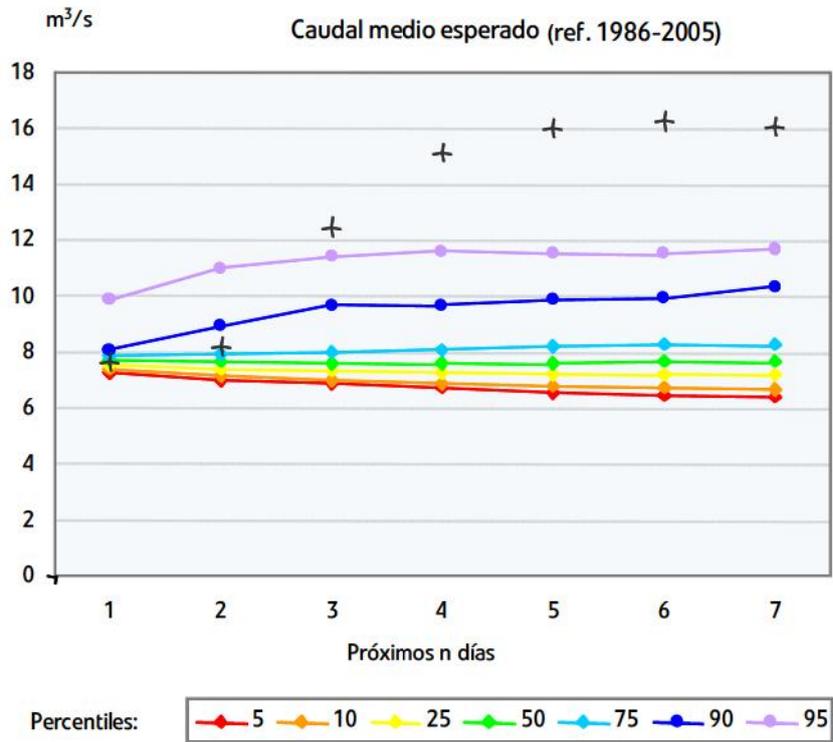
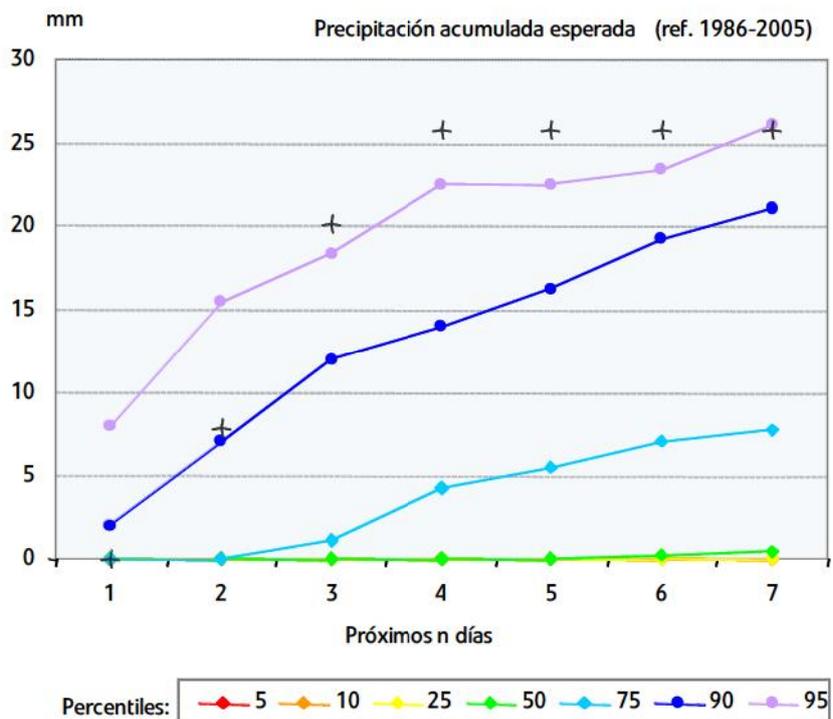


Figura 25. Precipitación acumulada esperada a partir del 15/3/2006
(Las cruces representan los datos observados)



6.1.5. Aportación predicha

La aportación de la cuenca para hoy y para los próximos días es función del estado de humedad de la cuenca al final del día de ayer, y de los valores que adopten las variables ambientales **precipitación, temperatura y ETP** en los próximos días. El modelo proporciona una estimación para la primera variable. Los valores futuros de las variables ambientales, aunque en general son desconocidos, son parcialmente predecibles. Si se dispone de predicciones meteorológicas, estas se pueden aprovechar para obtener predicciones de caudal.

En el desarrollo actual, se ha incluido la posibilidad de incorporar predicciones deterministas de precipitación y temperatura diarias para proporcionar unas predicciones de caudal de 1 a 7 días de alcance, que también son deterministas.

Los gráficos de las figuras 26 y 27 son equivalentes a los anteriores (figuras 24 y 25), pero incorporan además las predicciones deterministas de aportación y caudal medio.

Figura 26. Aportación acumulada esperada en El Vado a partir del día 25/10/2006
(Los círculos negros son aportaciones acumuladas predichas)

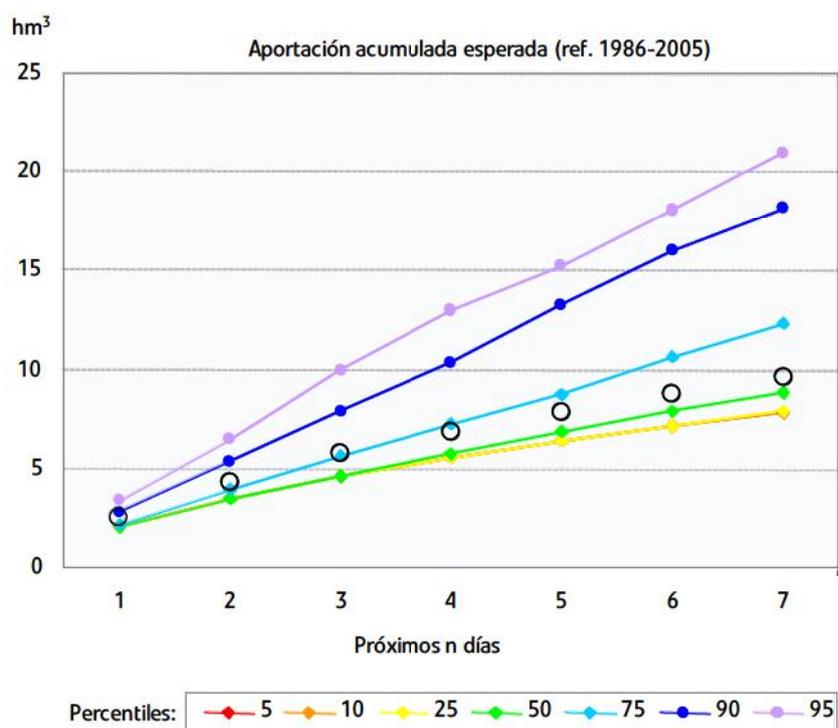
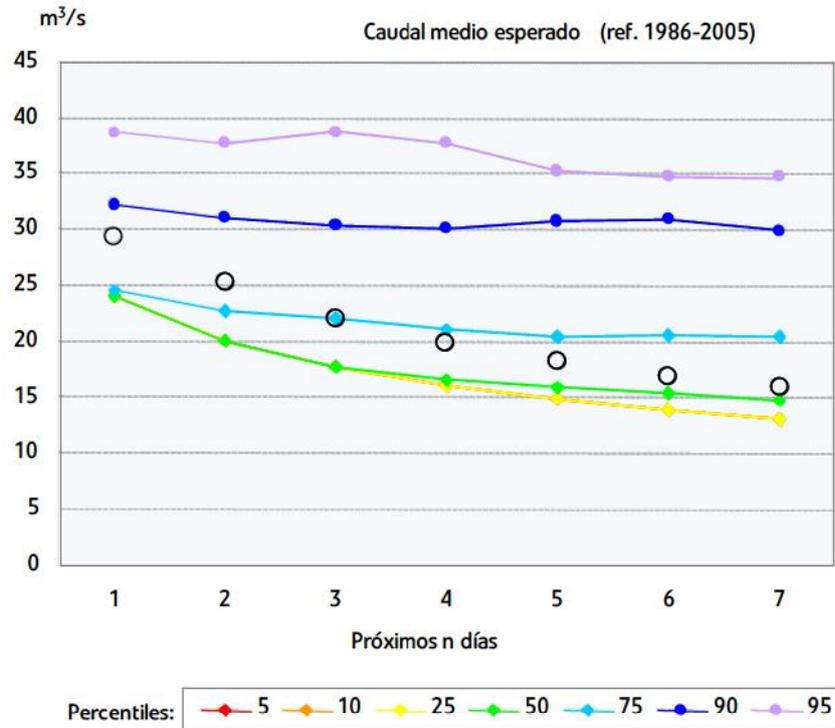


Figura 27. Caudal medio esperado en El Vado a partir del día 25/10/2006
(Los círculos negros son aportaciones acumuladas predichos)



6.2. Aplicación informática

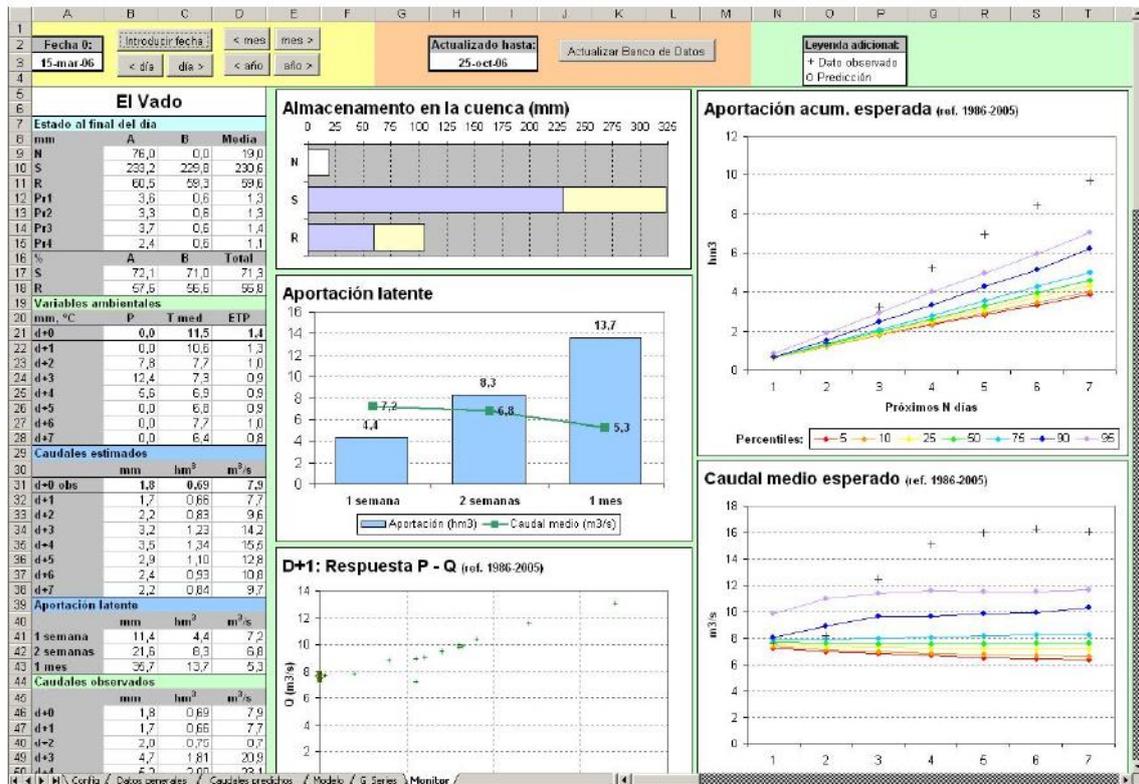
Se ha desarrollado una aplicación que implementa el modelo y un conjunto de funciones para su operación integrada en los sistemas de información de Canal de Isabel II con la actualización de datos, lectura de predicciones meteorológicas, navegación por el calendario y visualización de resultados.

La visualización de resultados se corresponde básicamente con el tipo de información que se ha descrito en el epígrafe 6.1 anterior (ver figura 28).

La aplicación se implementa en un archivo Excel, ampliado con código VBA (Visual Basic for Applications), desarrollado al efecto. Cada archivo Excel contiene un único modelo. Así pues, se han creado tres archivos, correspondientes a cada uno de los modelos de cuenca ajustados.

Una vez configurada la aplicación, el uso es relativamente sencillo y de fácil navegación.

Figura 28. Aspecto de la hoja "Monitor". Interfaz de usuario de la aplicación



7

Conclusiones

7.1. Conclusiones generales

Los trabajos realizados en el marco del Estudio piloto para la integración de la predicción meteorológica en los módulos de gestión del sistema de abastecimiento han producido los siguientes resultados:

- a) Se dispone de una formulación sencilla para construir modelos de aportaciones diarias a los embalses de Canal de Isabel II operables con los datos diarios disponibles. La formulación se basa en el modelo de balance GR4J al que se incorpora un algoritmo para representar los procesos asociados al manto de nieve. La combinación de ambos elementos es original y se ha denominado GR4JN.
- b) A la formulación anterior se le ha incorporado un sistema para la retroalimentación de errores del modelo, que permite introducir la información proporcionada por los datos recientes de caudal diario. Este tipo de retroalimentación es original en los modelos de balance y ha demostrado una notable eficacia para mejorar las estimaciones de caudal en los alcances de predicción cortos.
- c) El modelo se ha ensayado para la simulación de aportaciones diarias en tres embalses de los gestionados por Canal de Isabel II: Pedrezuela, La Jarosa y El Vado. Se ha contado con las series de datos hidrológicos y meteorológicos diarios desde 1986 y se han obtenido resultados satisfactorios.
- d) Se ha evaluado la capacidad predictiva de los modelos para diferentes alcances de predicción (de 1 a 10 días) mediante el concepto de eficiencia hidrológica, eficiencia del modelo en el supuesto de que los datos meteorológicos son conocidos. En este supuesto, la predicción con n días de alcance supone que se conocen la precipitación y la evapotranspiración para el día que se predice y los anteriores, pero el último dato de caudal conocido es anterior en n días al dato que se desea estimar.

Como resulta esperable, la eficiencia hidrológica disminuye a medida que aumenta el alcance de predicción, teniendo como límite la eficiencia del modelo no retroalimentado o en funcionamiento libre (que representa el caso en el que el modelo no se apoya en ningún dato de caudal previo).

- e) Se han estudiado otras estrategias de modelización alternativas (modelo SIMHYD, modelos de regresión, modelo Qb+Qf). El modelo GR4JN proporciona, en general, mejores resultados en términos de eficiencia predictiva, a la vez que requiere ajustar menos parámetros.
- f) Se han explorado e identificado las vías para la explotación operativa de los modelos, concretamente en la estimación de aportaciones futuras para los próximos días. Esta se obtiene de la combinación de:
 - La representación actualizada del estado de humedad de la cuenca que proporciona el modelo
 - La información disponible sobre la meteorología esperable en los próximos días (estadística climatológica, predicciones meteorológicas)
 - La capacidad de simulación hidrológica del modelo

- g) Se ha desarrollado una aplicación que implementa el modelo y un conjunto de funciones para su operación integrada en los sistemas de información de Canal de Isabel II con actualización de datos, incorporación de predicciones meteorológicas, navegación por el calendario y visualización de resultados. Estas funciones permiten el mantenimiento actualizado del modelo y su aplicación operativa en la predicción de aportaciones futuras.

En conclusión, merced a los trabajos realizados se ha obtenido una herramienta capaz de traducir la información hidrológica y meteorológica, disponible diariamente en Canal de Isabel II, en información sobre aportaciones para los próximos días. El proceso descansa sobre un modelo hidrológico de balance que proporciona una representación del estado de humedad de la cuenca. Además, el estado de humedad simulado se corrige mediante retroalimentación con los datos de caudal de los días anteriores.

7.2. Propuestas para la continuación de los trabajos

Los trabajos realizados han constituido un estudio piloto, centrado en una selección de tres cuencas. Los resultados obtenidos, por tanto, deben interpretarse también desde la perspectiva de la búsqueda de vías prometedoras para la continuación de la investigación.

Una vía inmediata de continuación de los trabajos es la extensión del análisis al resto de cuencas alimentadoras de embalses gestionados por Canal de Isabel II. Una fase de evaluación de los resultados proporcionados por la herramienta actual en condiciones operativas puede ser la condición previa natural para iniciar esta actividad.

En el desarrollo actual, concebido para un número limitado de cuencas, la aplicación que se ha desarrollado trata cada cuenca de forma separada. La extensión al resto de cuencas implicaría la necesidad de lograr algún tipo de integración de todas ellas en una herramienta de predicción única.

Con un enfoque más orientado a la investigación de nuevas posibilidades se plantean otras vías de continuación de los trabajos como las tres que se describen a continuación:

a) Incorporación de las predicciones meteorológicas probabilísticas

En el presente estudio, la incorporación de las predicciones meteorológicas se ha limitado a las de tipo determinista, cuya aplicación es relativamente sencilla, una vez se cuenta con las herramientas de simulación hidrológica. Sin embargo, la información meteorológica disponible en Canal de Isabel II incluye predicciones de tipo probabilístico. La incorporación de este tipo de predicciones meteorológicas podría enriquecer las estimaciones de aportación, al permitir el tratamiento de la incertidumbre meteorológica en términos de probabilidad. Esta tarea no es inmediata y exige un desarrollo que ha quedado fuera del alcance del estudio piloto.

b) Ensayo de nuevos sistemas de retroalimentación

La retroalimentación del modelo hidrológico se ha mostrado muy eficaz para aprovechar la información proporcionada por los datos de caudal del pasado inmediato. El método de retroalimentación desarrollado utiliza el último dato de caudal disponible, y lo compara con el correspondiente caudal simulado para corregir el estado de humedad de la cuenca. Se introduce un límite máximo a la corrección para garantizar que el efecto de la retroalimentación sea parsimonioso. Sin embargo, puede ser interesante ensayar otras posibilidades que utilicen, no uno, sino varios datos de caudal cada vez (los n últimos datos, en lugar de sólo el último).

c) Mejora de la simulación de los procesos asociados al manto de nieve

La ausencia de datos de contraste resta credibilidad a cualquier intento de sofisticación en la formulación del modelo de los procesos asociados al manto de nieve. No obstante, el desarrollo continuo de la teledetección y tal vez otras fuentes de información podrían proporcionar, en un futuro próximo, una base para la obtención de series de datos relacionados con la evolución de la cubierta de nieve en las cuencas de los embalses de Canal de Isabel II, a partir de las cuales fuera posible ensayar y ajustar modelos con mayor capacidad para representar el fenómeno.

8

Anexos

Anexo 1. Referencias**CANAL DE ISABEL II, 1991**

Puesta a punto y validación del modelo de predicción de aportaciones diarias a los embalses de Canal de Isabel II, 1991 (no publicado).

CANAL DE ISABEL II, 1997

Establecimiento de las bases para un sistema de ayuda a la gestión de resguardos y desembalses, 1997 (no publicado).

CEMAGREF internet, CEMAGREF. GR.

Modèles hydrologiques du Génie Rural. GR4J.

http://www.cemagref.fr/webgr/Mod%C3%A8les/GR4J/Sch%C3%A9ma_gr4j_journalier.htm

CHIEW et al. 2002, CHIEW, F.H.S., PEEL, M.C. and WESTERN, A.W.

Application and testing of the simple rainfall-runoff model SIMHYD. En: SINGH y FREVERT 2002, pp. 335-367

CIF internet

Phytosociological Research Center (CIF).

<http://www.ucm.es/info/cif>

CUBILLO, Francisco, 1991

Un modelo de cuencas basado en el programa HSPF como apoyo a la operación de embalses de Canal de Isabel II. Curso sobre modelos hidrológicos de simulación continua de la cuenca, CEDEX, Madrid 1991.

ECKHARDT, K., 2005

How to construct recursive digital filters for baseflow separation. Hydrological Processes 19, pp. 507-515.

ESTRELA, Teodoro, 1991

Los modelos de simulación continua de la cuenca. Curso sobre modelos hidrológicos de simulación continua de la cuenca. CEDEX, Madrid 1991

ESTRELA, Teodoro, 1991

Calibración de parámetros, problemática. Curso sobre modelos hidrológicos de simulación continua de la cuenca, CEDEX, Madrid 1991

ESTRELA, Teodoro, 1992

Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos. CEDEX, Madrid, 1992.

8. Anexos

ESTRELA, Teodoro, 2001

La evaluación de los recursos hídricos en España. XXXV Curso de Hidrogeología Noel Llopis. Universidad Complutense de Madrid, Centro de Estudios Hidrográficos, CEDEX, Madrid 2001

FUREY, Peter R., GUPTA, Vijay K., 2001

A physically based filter for separating base flow from streamflow time series.
Water Resources Research, Vol. 37, N° 11, pp. 2709-2722. November 2001.

GUPTA, Ram S., 1989

Hydrology and Hydraulics Systems. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1989.

KOKKONEN, T.S., JAKEMAN, A.J., 2001

A comparison of metric and conceptual approaches in rainfall-runoff modelling and its implications.
Water Resources Research Vol. 37, N° 9, pp. 2345-2352. September 2001

LIMBRUNNER, J. F., VOGEL R. M., and CHAPRA S. C., 2005

A parsimonious watershed model.

Singh, V. P., Computer Models of Watershed Hydrology, 2nd ed., Boca Raton, Florida. CRC 2005.

LU, Jiambiao, Ge SUN, Steven McNULTY, Devendra M. AMATYA, 2005.

A comparison of Six Potential Evapotranspiration Methods for Regional Use in the Southeastern United States.
Journal of the American Water Resources Association (JAWARA) 41(3):621-633

MAPA 1989

Caracterización agroclimática de la provincia de Madrid. Dirección General de Producción Agraria.
Madrid, 1989

PODGER, Geoff, 2004

Rainfall Runoff Library User Guide version 1.0.5. CRC for Catchment Hydrology.
Australia 2004 (www.toolkit.net.au/rrl).

SINGH, Vijay P., Donald K. FREVERT, 2002

Mathematical Models of Small Watershed. Hydrology and Applications.
Water Resources Publications, LLC. 2002

SINGH, Vijay P., David A. Woolhiser, 2002

Mathematical Modeling of Watershed. Hydrology.
Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 7, No. 4, July 1, 2002

STERMAN, John, 1991

A Skeptical Guide to Computer Models. Barney, G.O. et al. (eds.), Managing a Nation: The Microcomputer
Software Catalog. Boulder, CO: Westview Press, 209-229.

Anexo 2. Índice de figuras

Figuras		Páginas
1	Componentes y esquema de funcionamiento del modelo	17
2	Formulación Modelo SIMHYD	21
3	Pedrezuela Qb + Qf retroalimentado	25
4	Presa de la Jarosa	26
5	Relación entre Q_n y T, caso general	33
6	Pedrezuela GR4J, semestre de calibración 1/10/95 a 1/4/96	35
7	Pedrezuela GR4J, semestre de validación 1/10/03 a 1/4/04	35
8	Capacidad de predicción en Pedrezuela modelo GR4J_rSR	37
9	Pedrezuela modelo GR4J	37
10	Pedrezuela regresión: capacidad de predicción	39
11	Pedrezuela modelo Qb+Qf	40
12	La Jarosa modelo GR4jN	42
13	La Jarosa modelo GR4jN, nieve acumulada invierno 1995-96	43
14	La Jarosa GR4jN_rTSR: Capacidad de predicción	44
15	El Vado GR4jN_rTSR: Capacidad de predicción	45
16	Estado de la cuenca El Vado al final del día 26/2/2006	47
17	Estado de la cuenca El Vado al final del día 15/10/2006	47
18	Estado de la cuenca El Vado al final del día 25/10/2006	47
19	Aportación latente a partir del día 15/10/2006	48
20	Aportación latente a partir del día 25/10/2006	49
21	Relación precipitación-caudal para el día 26/10/2006	50
22	Relación precipitación-caudal para el día 26/2/2006	50
23	Aportación acumulada esperada a partir del 15/3/2006	51
24	Caudal medio esperado a partir del 15/3/2006	52
25	Precipitación acumulada esperada a partir del 15/3/2006	52
26	Aportación acumulada esperada en El Vado a partir del día 25/10/2006	53
27	Caudal medio esperado en El Vado a partir del día 25/10/2006	54
28	Aspecto de la hoja "Monitor" Interfaz de usuario de la aplicación	55

Anexo 3. Índice de tablas

Tablas		Páginas
a	Títulos en la colección de Cuadernos de I+D+i	5
1	Parámetros del modelo Qb + Qf	24
2	Estadísticos de ajuste de calibración de los modelos continuos de las aportaciones diarias de Pedrezuela	34
3	Estadísticos de ajuste de validación de los modelos continuos de las aportaciones diarias de Pedrezuela	34
4	Coefficientes de eficiencia hidrológica en función del alcance	36
5	Resultados para la regresión [2]	38
6	Resultados de ajuste para el modelo de regresión [2]	38
7	Resultados de ajuste de calibración del modelo Qb+Qf	39
8	Resultados de ajuste de validación del modelo Qb+Qf	40
9	Estadísticos de ajuste de calibración de los modelos	41
10	Estadísticos de ajuste de validación de los modelos	41
11	Coefficientes de eficiencia en función del alcance	43
12	Eficiencia hidrológica del modelo de El Vado	44

Canal de  Isabel II