

Aplicación del modelo de Témez a la determinación de la aportación superficial y subterránea del sistema hidrológico Cornisa-Vega de Granada para su implementación en un modelo de uso conjunto

J. M. Murillo⁽¹⁾ y J. A. Navarro⁽²⁾

(1) Instituto Geológico y Minero de España. C/ Ríos Rosas 23. 28003. Madrid. España.

jm.murillo@igme.es

(2) ETS Ingenieros Minas. Universidad Politécnica Madrid. C/ Ríos Rosas 21. 28003. Madrid. España.

janavarro@tihgsa.net

RESUMEN

En el presente artículo se utiliza el modelo de Témez para calcular la aportación total, superficial y subterránea en régimen natural y se indica la forma en que se integran las series obtenidas en el código de uso conjunto SIMGES. En la literatura científica son numerosos los modelos de simulación que se pueden aplicar para determinar la aportación total de una cuenca. A este respecto el modelo de Témez es un código relativamente sencillo, que en ciertos casos, como se apunta en el presente artículo, puede presentar ventajas sobre otros códigos más complejos. Para una mejor comprensión de dicho código se ha procedido a incluir un apartado donde se desarrollan los fundamentos matemáticos del mismo. El modelo de Témez se ha aplicado a la determinación de la aportación superficial y subterránea del sistema hidrológico Cornisa-Vega de Granada, que está constituido por 25 subcuencas hidrográficas, 5 embalses y 23 acuíferos, por lo que la interrelación que existe entre aguas superficiales y subterráneas es bastante compleja y relativamente difícil de evaluar. A esto se une que en algunos puntos las series generadas resultan difíciles de calibrar, pues el régimen natural se encuentra muy alterado. A lo largo del artículo se analizan y valoran los cuatro parámetros que utiliza el modelo de Témez y los factores que condicionan tanto su calibración como la credibilidad e incertidumbre de los resultados que se obtienen tras su aplicación.

Palabras clave: aportación superficial y subterránea, Granada, modelo de Témez, modelo precipitación-escorrentía, uso conjunto

Application of the Témez model to determine surface and groundwater influx into the Cornisa/Vega-de-Granada water system with a view to integrating it into a conjunctive use code

ABSTRACT

We describe an application of the Témez model to calculate total water influx in a natural regime and its division into its surface and groundwater components. We also suggest a suitable way of integrating the data series obtained into the SIMGES conjunctive use code. The literature offers a considerable number of precipitation-runoff models for calculating the total influx into a basin. Within this context the Témez model is a relatively simple code which in certain cases has decided advantages over more complex ones, as we point out in this paper. For a better understanding of this model, we include an annex showing its mathematical basis. We used the Témez model to calculate the surface and groundwater influx into the Cornisa-Vega de Granada water system, which comprises 25 river sub-basins, 5 reservoirs and 23 aquifers, meaning that the interrelation between surface water and groundwater is quite complex and difficult to assess. In addition to this, some points of the series are quite difficult to calibrate because the natural regime of the water system is being considerably altered by human activity. We analyse the four parameters used in the Témez model together with the factors affecting both its calibration and the reliability and uncertainties of the results deriving from its application.

Key words: conjunctive use, Granada, precipitation-runoff model, surface and groundwater influx, Témez model

Introducción

Los códigos informáticos que permiten modelar y simular la gestión conjunta de aguas superficiales y

subterráneas precisan que se les suministren, como uno de los datos de entrada a los mismos, las series de aportaciones en régimen natural, que se registran en el sistema de recursos hídricos que se pretende

analizar, para así poder aplicar el principio de superposición y reducir el tiempo de cálculo de ordenador que requiere este tipo de modelación, que puede ser muy largo, dada la complejidad de los sistemas hídricos que normalmente se estudian y la interrelación que se presenta entre los múltiples elementos que los conforman (Sahuquillo, 1983; Pulido *et al*, 2006).

La cuantificación de la aportación y la generación de series sintéticas en régimen natural se determinan a partir de códigos informáticos que transforman, mediante la utilización de diferentes algoritmos, los datos de precipitación en escorrentía. El tipo de código que se emplea en cada caso es función de la cantidad y calidad de los datos disponibles, así como del detalle que se pretende alcanzar (Estrela, 1992-a; Murillo y Navarro, 2010). Atendiendo a estas premisas se establece la siguiente clasificación (Estrela, 1992-b):

- Códigos que permiten abordar modelaciones agregadas con un reducido número de parámetros. Su escala temporal suele ser el mes y el número de parámetros varía entre 2 y 6.
- Códigos que permiten abordar modelaciones agregadas con un elevado número de parámetros. Operan normalmente a escala diaria y pueden llegar a utilizar hasta 25 parámetros.
- Códigos que permiten abordar modelaciones de tipo distribuido, tanto en el espacio como en el tiempo. Precisan de una gran cantidad de datos, cuya obtención no se suele contemplar, salvo excepciones, cuando se planifican estudios hidrogeológicos regionales, debido al elevado coste que conlleva su adquisición, por lo que el empleo de este tipo de códigos precisa casi siempre de la realización de estudios complementarios, que comportan importantes inversiones, lo que condiciona su operatividad y utilización. El código más conocido a nivel internacional es el SHE (European Hydrological System)(Abbott *et al*, 1986).

El código que ha gozado de una mayor difusión y divulgación en España, como programa específico para determinar la recarga a los acuíferos, es el VISUAL BALAN (Samper y García Vera, 1988 en Samper *et al*, 1997). El desarrollo de este código fue financiado por la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (ENRESA) (Samper *et al*, 1999), pero una gran parte de las mejoras realizadas se efectuaron en el marco de proyectos de investigación acometidos por la Confederación Hidrográfica del Ebro y la Universidad de La Coruña (García Vera y Arqued, 2000; Samper y García Vera, 2004). VISUAL BALAN se ha utilizado con cierta profusión en la Universidad Politécnica de Cataluña para evaluar la recarga en acuíferos kársticos de las islas Baleares y de las

Cuencas Internas de Cataluña (Valls, 2001). El Instituto Geológico y Minero de España (IGME) lo ha empleado en el cálculo de la recarga natural a los acuíferos de diferentes cuencas de la isla de Gran Canaria (Heredia y Murillo, 2002), en el acuífero de Cabo Roig (Romero *et al*. 2004) y Torrevieja (Murillo *et al*. 2007) en la provincia de Alicante, en el acuífero de Motril-Salobreña en la provincia de Granada (García Aróstegui *et al*. 2001) y en el acuífero de Crestatx en la isla de Mallorca (Ortiz *et al*. 2008). Fuera de este ámbito su utilización se vio notablemente restringida durante muchos años, ya que la licencia de uso de su versión más amigable resultaba difícil de adquirir.

VISUAL BALAN es un código que opera a escala diaria y realiza de forma secuencial las siguientes determinaciones: volumen de agua aplicada al suelo; valor de la evapotranspiración potencial; interceptación y flujo preferencial; escorrentía superficial; evapotranspiración real y flujo de salida de la zona edáfica; flujo hipodérmico; recarga al acuífero; caudal de descarga del acuífero y variación del nivel piezométrico. A mediados de la pasada década, VISUAL BALAN se acopla a un Sistema de Información Geográfica que permite determinar la distribución espacial de las variables que calcula (Samper *et al*, 2005).

Otros códigos hidrológicos que se han desarrollados en España bajo una concepción hidrogeológica son los siguientes: QKARST (Aragón *et al*, 1985), que se ha utilizado en algunos estudios hidrogeológicos de la provincia de Alicante para calcular el balance de agua en el suelo separando la escorrentía superficial de la infiltración, que en este caso equivale a la recarga a los acuíferos por considerar nula la escorrentía hipodérmica; SOILB (Martín Machuca y Virgos, 1985), que es un modelo de parámetros distribuidos que se construyó específicamente para calcular las entradas de agua al acuífero del Parque Nacional de Doñana; CBAS (López Rodríguez y Giráldez, 1992 en López Rodríguez y Giráldez, 1997), que está orientado al riego agrícola y a determinar el efecto de la cubierta vegetal en los balances hidrológicos; ERLURE (Murillo, 2004), que permite calcular a escala diaria y de forma individualizada la recarga que tiene lugar por precipitación y riego mediante el empleo de cinco parámetros, entre los que se incluye uno que se ha denominado máximo almacenamiento hídrico de la agrupación suelo-vegetación, que incorpora el resultado del proceso interceptación-encharcamiento y el máximo volumen de agua que puede retener el suelo para ser utilizado por las plantas; ERAS (Murillo y de la Orden, 1996; Aguilera y Murillo, 2008) cuya aplicabilidad se encuentra restringida a acuíferos que, por

causa del bombeo que se realizan en los mismos, carecen desde hace años, como mínimo varias décadas, de drenajes naturales en superficie y transferencias subterráneas de flujo a otros acuíferos; y SIMPA (Ruiz García, 1999), que es un modelo hidrológico de simulación de tipo determinístico y distribuido, que evalúa los recursos hídricos en régimen natural a escala mensual en grandes cuencas hidrográficas a partir del modelo de Témez (Témez, 1977).

En los últimos años se ha producido un desarrollo notable de los métodos de estimación de la recarga que se presentan acoplados a Sistemas de Información Geográfica (Conrad *et al.*, 2004). A este respecto el IGME ha implementado el método APLIS (Andreo *et al.*, 2004), que no realiza una modelación hidrológica, pero permite estimar la tasa de recarga media en acuíferos carbonáticos expresada como porcentaje de la precipitación. También se ha programado (Álvarez *et al.*, 2005; Potenciano y Villaverde, 2010) una versión del modelo hidrológico distribuido de Témez sobre GRASS GIS (Geographic Resources Analysis Support System) (USA-CERL, 1982), que evalúa los recursos hídricos en régimen natural de la totalidad del territorio español con paso de tiempo mensual.

Objetivo y metodología

El objetivo del presente trabajo es determinar la aportación superficial y subterránea en las distintas cuencas que conforman el sistema hidrológico Cornisa-Vega de Granada, para su implementación en el código de uso conjunto SIMGES (Andreo *et al.*, 2007), mediante la aplicación del modelo de Témez.

El desarrollo metodológico que se ha seguido en el presente artículo para el cálculo de las aportaciones en régimen natural de una serie de caudal suficientemente larga y extensa (53 años, periodo 1951-2004), que es una condición imprescindible para que dicha serie pueda representar con exactitud el comportamiento estocástico de la escorrentía superficial (la subterránea no precisa series tan largas ya que su aleatoriedad es menor), se ha fundamentado en la realización de las siguientes tareas:

- Recopilación y tratamiento de datos meteorológicos (precipitación y temperatura) y morfométricos (superficie de las cuencas en estudio).
- Aplicación de un código para la obtención de un modelo determinístico de precipitación-aportación y parámetros agregados, que permita calcular la aportación en régimen natural en cada una de las cuencas hidrológicas que conforman el sistema de recursos hídricos que se pretende analizar. Es

recomendable que el código que se emplee separe la componente superficial de la subterránea, aunque SIMGES solo admite como dato de entrada la escorrentía total. No obstante, es posible considerara en SIMGES la componente superficial y subterránea por separado, siempre que para cada acuífero se establezca una conexión río-acuífero con la condición de pérdida total, lo que permite introducir como recarga al acuífero la infiltración que proporciona el modelo de Témez. Esta forma de operar tiene la ventaja de poder actuar directamente sobre el acuífero y controlar lo que ocurre en el mismo cuando se le somete a una determinada acción. Aspecto este que no se puede realizar cuando se opera solo con la aportación total.

- Calibración de las series que proporciona el código con los registros medidos en todas las estaciones foronómicas e hidrométricas representativas del sistema hidrológico que se está estudiando, si estos no están influenciados por acciones externas, o con los restituidos al régimen natural en el caso de que lo estén.

El código que se ha utilizado para el cálculo de las aportaciones es el modelo de Témez (Témez, 1977; Estrela y Quintas, 1996; Ruiz, 1999; Cabezas *et al.*, 1999; Pizarro *et al.*, 2005) en la versión que se denomina "Témez modificado" (Estrela, 1997). Este código precisa para su aplicación que se le suministren datos morfométricos (superficie de las cuencas en estudio) y meteorológicos (precipitación, temperatura y evapotranspiración) de las cuencas hidrológicas que se quieren estudiar, así como una serie de parámetros específicos, que se detallan y describen en el apartado titulado "Fundamentos matemáticos del modelo de Témez".

Este modelo considera el suelo como un único almacenamiento en el que entra agua de lluvia y sale agua evapotranspirada. El excedente de agua se reparte entre el agua que escurre superficialmente y el agua que se infiltra, se almacena y fluye a través del acuífero para ser descargada posteriormente a los ríos. El acuífero se modela mediante un parámetro de agotamiento similar al utilizado por los modelos celulares (Solera *et al.* 2010).

La calibración del modelo de Témez se aborda mediante la comparación de las aportaciones, que se han obtenido tras la aplicación del mismo, con los datos foronómicos que se han registrado en las estaciones de aforo representativas del sistema hidrológico que se está estudiando y que responden a una situación no influenciada. En estas estaciones, que representan un régimen de funcionamiento hidrológico natural, se toman los datos de caudal tal cual

figuran en los anuarios de aforos o en las bases de datos de hidrometría de los Organismos competentes en esta materia, pero en aquellas otras que están sujetas a regulación es necesario restituir las series de caudal al régimen natural, lo que suele ser factible en el caso de la aportación regulada por infraestructuras de tipo superficial, pero no siempre posible en el caso de la escorrentía subterránea, ya que en muchos acuíferos existe una falta generalizada de datos para una serie temporal suficientemente larga y representativa de la explotación que se ha realizado o se está realizando. Estas apreciaciones afectan a todos los códigos hidrológicos que pretenden calcular la escorrentía superficial y subterránea en régimen natural.

En la actualidad, como se ha expuesto en el apartado introductorio del presente artículo, existen otros códigos, que pueden proporcionar una mayor precisión, que la versión del modelo de Témez que se utiliza en el presente trabajo, siempre que se disponga de datos suficientes y acordes a la escala temporal de simulación y a los parámetros que se requieren. La versión del modelo de Témez, que se utiliza en el presente trabajo, cuya aplicación presenta una notable sencillez, puede suministrar en numerosas ocasiones resultados suficientemente representativos para alimentar un modelo de simulación de uso conjunto como el que proporciona el código SIMGES, ya que éste opera con paso de tiempo mensual, que es el que normalmente utiliza el modelo de Témez, y con una demanda promedio mensual constante e igual para todo el ciclo modelado, que generalmente es de 50 años o más, independientemente del año climático en curso y de las variaciones demográficas o de producción agrícola que pueden acontecer a lo largo del periodo simulado, por lo que la aplicación de un modelo de precipitación-escorrentía, que proporcione una salida muy detallada y precisa para alimentar las aportaciones de entrada al código de simulación conjunta SIMGES, puede en ocasiones carecer de un cierto sentido práctico, dada la falta de concisión que pesa sobre otras variables de entrada al código de modelación.

A continuación se exponen una serie de argumentaciones y justificaciones, correspondientes a diferentes autores, que evidencian y avalan, bajo determinadas circunstancias, el empleo de modelos de precipitación-escorrentía relativamente sencillos. Éstas son las siguientes:

- El comportamiento de un sistema hídrico se puede reproducir de forma suficientemente aproximada mediante el empleo de modelos muy simples, como el de Témez, que en una primera aproximación resulta especialmente adecuado para introdu-

cir en la simulación global de los recursos hídricos el efecto de la componente subterránea del ciclo hidrológico (Estrela, 1992-b). El empleo de modelos más sofisticados, si se requiriera una mayor precisión, se puede realizar en una etapa posterior del estudio, bien efectuando un nuevo planteamiento o bien elaborando un nuevo modelo conceptual (Sahuquillo, 1993).

- Los modelos con un mayor número de parámetros, que parecen en principio más adecuados para proporcionar mejores resultados, no lo son tanto en la práctica debido a la incertidumbre que a menudo se detecta en los datos disponibles (Tapia y Mora, 2004). En líneas generales se establece que la aplicabilidad de estos modelos es adecuada en estudios de investigación o en aquellos otros donde la información hidrogeológica disponible es muy completa, mientras que las aplicaciones sencillas son aptas para un mayor número de trabajos por proporcionar de forma rápida y, en general, simple, una primera aproximación al problema que se estudia (López Rodríguez y Giráldez, 1997).
- No siempre es necesario, o factible, recurrir, para simular un acuífero, a modelos complicados de parámetros distribuidos, que precisan un alto grado de detalle, aunque también proporcionen una elevada resolución, ya que su empleo puede no ser viable por falta de datos adecuados que permitan obtener una calibración satisfactoria (Sahuquillo, 1993).
- Cuando se simulan más procesos que los estrictamente necesarios puede ocurrir que los parámetros ligados a dichos procesos no proporcionen un mejor resultado, ya que suelen originar interferencias en el proceso de calibración del modelo (Estrela, 1992-b).
- La elaboración de un modelo matemático conlleva un considerable esfuerzo, tanto de índole humana como técnica, por lo que es recomendable plantear su construcción mediante simplificaciones acordes al objetivo que se pretende conseguir (Sahuquillo, 1972).
- Trabajar con un modelo simplificado, o implementado por un menor número de datos, no implica que dicho modelo sea erróneo ni de menor calidad, aunque es preciso tener presente que el modelo puede no ser válido fuera del contexto para el que fue creado (Delgado y López García, 1983).
- Sea cual sea el grado de complejidad con el que se afronte un modelo matemático, hay que tener presente que el mismo es un instrumento que permite verificar y corroborar hipótesis de funciona-

miento hidrogeológico, que alcanza su máxima utilidad, cuando los resultados se interpretan teniendo en cuenta las limitaciones que han impedido en su construcción (Lucena, 1986).

En el Programa estatal de estudios para la definición de la utilización coordinada de recursos superficiales y subterráneos (Sánchez González y Murillo, 1997), que elaboró el Ministerio de Medio Ambiente y el Instituto Geológico y Minero de España a mediados de la década de 1990, se recomendaba utilizar el modelo de Témez, como modelo de simulación hidrológica, en los estudios de uso conjunto que se definieron en dicho programa. A este respecto el IGME lo ha utilizado en los siguientes esquemas de utilización conjunta: Costa del Sol Occidental (Gómez *et al*, 2001), Sierra de Baza (Murillo *et al*, 2002), Marina Baja (Castaño y Murillo, 2003) y Sistema de explotación del Quiebrajano-Víboras (Murillo y Navarro, 2008).

Fundamentos matemáticos del modelo de Témez

El modelo de Témez (Témez, 1977) pertenece al grupo de los denominados modelos agregados de simulación de cuencas (Estrela, 1992-b). El modelo opera realizando balances de humedad entre los distintos procesos que tienen lugar en un sistema hidrológico desde instante en que comienza a llover hasta el momento en que se genera escorrentía y la posterior descarga de los acuíferos a los ríos.

El modelo realiza una valoración global, ya que no considera la distribución espacial de las variables y parámetros que intervienen en los cálculos, que se sustituyen por un valor medio, por lo que su aplicación se limita a cuencas pequeñas o de tamaño intermedio donde existe una cierta homogeneidad climática, edafológica y geológica. Su aplicación a grandes cuencas implica realizar una subdivisión en otras de menor tamaño, que verifiquen los condicionantes del método.

El desarrollo teórico del modelo de Témez es de índole general, por lo que en principio se puede aplicar cualquier intervalo de tiempo (horario, diario, semanal, mensual, anual), aunque se debe verificar que los periodos temporales que se utilicen proporcionen una respuesta coherente con la realidad física del sistema hidrológico en estudio. El intervalo temporal que más se usa es el mensual.

En el modelo de Témez, el agua que procede de la precipitación (P_i) se fracciona en dos componentes. Una es la evapotranspiración (EP_i) y la otra, que se denomina excedente total (T_i) es la suma de la escorrentía superficial (E_i) y de la infiltración (I_i), que tiene

lugar a través del suelo y de la zona no saturada de los acuíferos, por lo que para el instante de tiempo "i" se verificará que:

$$T_i = E_i + I_i \quad (1)$$

El excedente total (T_i) se calcula según la siguiente ley:

$$T_i = 0 \quad \text{si} \quad P_i \leq P_0 \quad (2)$$

$$T_i = \frac{P_i - P_0}{P_i - \delta_0 - 2P_0} \quad \text{si} \quad P_i > P_0 \quad (3)$$

donde:

$$\delta = H_{\text{máx}} - H_{i-1} + EP_i \quad (4)$$

y

$$P_0 = C (H_{\text{máx}} - H_{i-1}) \quad (5)$$

Siendo:

$H_{\text{máx}}$ la capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo (mm), que depende de la textura, la pendiente del terreno y el espesor de la franja de suelo donde tienen lugar la evapotranspiración. El valor de $H_{\text{máx}}$, que es del orden de 200 mm en cuencas de tipo medio (Témez, 1977), tiende a aumentar con aquellos factores que facilitan la retención superficial de agua (poca pendiente, presencia de vegetación, cultivos en surcos o bancales).

H_{i-1} el almacenamiento de agua en el suelo (mm) en el intervalo de tiempo $i-1$.

EP_i la evapotranspiración potencial (mm) en el intervalo de tiempo i .

C un factor adimensional, que toma valores entorno a 0,30 (Témez, 1977) y permite obtener el valor del umbral de precipitación P_0 a partir del déficit de humedad del suelo ($H_{\text{máx}} - H_{i-1}$). Cuando la cantidad de lluvia es inferior a P_0 toda el agua de lluvia se incorpora a la humedad del suelo y el excedente total T es nulo. A partir del valor P_0 , la precipitación incrementa simultáneamente el excedente y la componente de humedad del suelo hasta que se alcanza un cierto valor de la precipitación. En ese momento, ésta tiende asintóticamente a un valor δ , ya que tanto la capacidad de almacenamiento de la zona no saturada, como la evapotranspiración de la cuenca, tienen un límite máximo ($H_{\text{máx}}$ y ETP).

La infiltración I_i es función del excedente de agua (T_i) y del parámetro denominado infiltración máxima ($I_{\text{máx}}$) a través de la expresión empírica:

$$I_i = I_{\text{ex}} \frac{T_i}{T_i + I_{\text{máx}}} \quad (2)$$

De la anterior expresión se deduce que a medida que el excedente aumenta también lo hace la infiltración, hasta llegar asintóticamente a un máximo, y si el excedente es nulo también lo es la infiltración. La infiltración máxima ($I_{\text{máx}}$) no depende sólo de las propiedades del terreno, sino también de la intensidad y concentración de las precipitaciones. Suele tomar valores comprendidos entre 100 mm/mes y 400 mm/mes dependiendo de que la lluvia sea esporádica o persistente (Témex, 1977).

La escorrentía total que recibe un río en un determinado intervalo de tiempo es suma de la escorrentía superficial directa (E_i) y de la descarga de origen subterráneo

$$A_{T_i}$$

Ésta última se determina mediante la expresión:

$$A_{T_i} = A_{\text{mín}} + (1 - \beta)I_i \quad (3)$$

Donde:

$$A_{\text{mín}}$$

es la escorrentía subterránea mínima al inicio del intervalo de simulación "i". Ésta se determina mediante la expresión:

$$A_{\text{mín}} = \frac{Q_{i-1}}{\alpha} (1 - \beta^2) \quad (4)$$

Donde:

Q_{i-1} es el caudal subterráneo en el intervalo de tiempo anterior al intervalo de simulación y β un parámetro adimensional que se encuentra ligado al coeficiente de agotamiento del acuífero (α) y a la duración del intervalo de tiempo. Se determina a través de la siguiente expresión:

$$\beta = e^{-\alpha D/2} \quad (5)$$

Donde:

α es el coeficiente de agotamiento del acuífero y D la duración del intervalo de tiempo o paso de la discretización temporal.

Si el intervalo de cálculo es mensual, el parámetro β varía entre 0,6 y 0,8 en aquellos meses en los que se observa que no hay excedentes de precipitación

por ausencia o insuficiencia evidente de lluvia. β es una característica de cada cuenca e informa sobre la escorrentía subterránea. Si las aportaciones en los meses de estiaje son muy similares, se obtiene un valor alto de β , lo que significa que la cuenca presenta una elevada regulación natural. Por el contrario, si en ausencia de lluvias las aportaciones difieren mucho entre sí, el valor de β será muy bajo, lo que implica que la cuenca está escasamente regulada por los acuíferos.

La aportación que recibe una cuenca en un determinado punto de su cauce principal se puede determinar a partir de combinar las expresiones (1) y (3) mediante la siguiente fórmula:

$$A_{T_i} = A_{\text{mín}} + T_i - \beta I_i \quad (6)$$

El cálculo de la escorrentía subterránea en el modelo de Témex se puede determinar, ya que se asume la hipótesis que la recarga al acuífero coincide con la infiltración (Estrela 1992-a), mediante la aplicación de la curva de agotamiento de Maillet a través del método propuesto por Mangin (Mangin, 1982):

$$Q_i^s = Q_{i-1}^s e^{-\alpha \Delta t} \quad (7)$$

En dicha formulación se considera que la conexión hidráulica con el sistema superficial se puede contemplar mediante un factor de desagüe (α), que coincide con el coeficiente de agotamiento del acuífero, por lo que el caudal subterráneo en el intervalo de tiempo "i" vendrá dado por la siguiente expresión:

$$Q_i^s = Q_{i-1}^s e^{-\alpha \Delta t} + K \frac{I}{\Delta t} S_{\text{per}} (1 - e^{-\alpha \Delta t}) \quad (8)$$

Donde:

S_{per} es la superficie de afloramientos permeables. K un factor que depende de las unidades consideradas. Para Q_i en l/s, I en mm, Δt en días (30 días) y S_{per} en km^2 , vale $3,858 \cdot 10^{-7}$.

El modelo de Témex contempla el ajuste de 4 parámetros: $H_{\text{máx}}$, C , $I_{\text{máx}}$ y α . Dos de estos parámetros regulan el almacenamiento en el suelo ($H_{\text{máx}}$ y C), el tercero ($I_{\text{máx}}$) separa la escorrentía superficial de la subterránea y el cuarto (α) regula el drenaje subterráneo. También se precisa que se definan las condiciones iniciales de la simulación. Éstas son la humedad inicial en el suelo ((H_0) mm) y el almacenamiento inicial en el acuífero ($(V_0 = Q_0/\alpha) \text{hm}^3$). El efecto de los

valores iniciales se reduce a medida que transcurre el tiempo, por lo que estos resultan poco significativos.

El modelo de Témez es fácil de implementar sobre una Hoja de Cálculo tipo EXCEL. Éste es el procedimiento que se ha seguido para su aplicación en el presente artículo. El ajuste de parámetros, operación que requiere una reiteración en el cálculo hasta conseguir un residuo adecuado entre las series a simular (series históricas originales o restituidas) y las calculadas, se ha realizado mediante sub-códigos específicos (macros). La utilización de sistemas de auto-ajuste de parámetros exige que previamente se fije una

horquilla de variación muy estricta para cada uno de los parámetros que intervienen en el proceso, ya que en caso contrario, se asume un alto riesgo de obtener datos numéricamente correctos, pero alejados de la realidad hidrológica modelada.

Sistema hidrológico Cornisa-Vega de Granada

El sistema hidrológico Cornisa-Vega de Granada se vertebra en torno a los cauces de los ríos Genil, Cubillas y Cacin (Tabla 1 y Figura 1).

CUENCA	SUBCUENCA ⁽¹⁾		Superficie		
			impermeable (km ²)	permeable (km ²)	
Genil	1.0	Bajo Genil (Vega de Granada)	92,4	6,6	
	1.0.0	Medio Genil (Vega de Granada)	130,7	137,0	
	1.1.0	Darro	41,8	41,2	
	1.2.0	Genil (S ^o Nevada)	25,1	2,3	
	1.2.1	Alto Genil (Canales)	156,2	20,4	
	1.2.2	Bajo Aguas Blancas	31,2	6,9	
	1.2.3	Aguas Blancas-Padules	29,1	23,9	
	1.2.4	Alto Aguas Blancas (Quectar)	9,3	38,9	
	1.3.0	Bajo Monachil	22,6	49,3	
	1.3.1	Alto Monachil	24,1	7,5	
	1.4.0	Bajo Dilar	77,3	39,3	
	1.4.1	Alto Dilar	27,0	17,8	
	1.5.0	Arroyo del Salado	102,4	29,4	
	1.6.0	Arroyo del Noniles	119,8	22,1	
	Cubillas	2.0.0	Cubillas Bajo	59,8	22,8
		2.1.0	Arroyo del Charcón	87,6	30,0
2.2.0		Bajo Veillos	64,4	23,5	
2.2.1		Alto Veillos	267,3	0,0	
2.3.0		Colomera	55,9	15,2	
2.3.1		Rio de Las Juntas	214,2	41,8	
2.4.0		Bermejo-Embalse Cubillas	88,8	13,5	
2.4.1		Cubillas-Deifontes	368,5	176,2	
Cacin	3.0.0	Bajo Cacin	55,9	0,0	
	3.1.0	Medio Cacin	57,9	0,0	
	3.2.0	Alto Cacin (Embalse Bermejales)	77,2	189,7	

(1) Los códigos que figuran junto al nombre de cada una de las subcuencas tienen por objeto clarificar y facilitar la lectura de los mapas que se muestran en las figuras 1, 2 y 3. El primer número del código hace referencia al curso fluvial principal, el segundo a sus afluentes directos y el tercero a una subcuenca o tributario de orden menor.

Tabla 1. Cuencas y Subcuencas del Sistema hidrológico Cornisa-Vega de Granada con indicación de su superficie permeable e impermeable

Table 1. Basins and sub-basins of the Cornisa-Vega de Granada water system, indicating permeable and impermeable surfaces

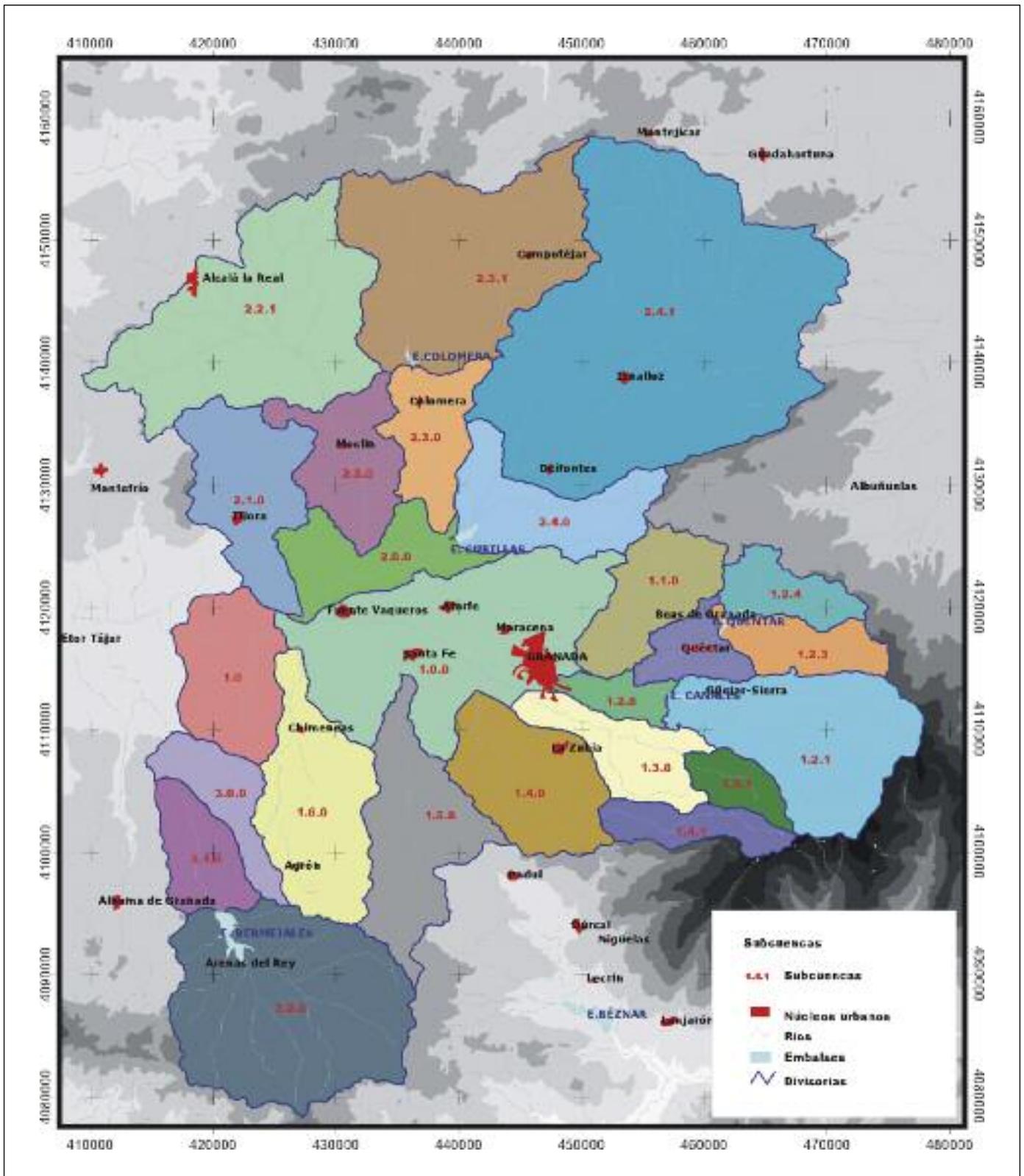


Figura 1. Cuencas y Subcuencas del sistema hidrológico Cornisa-Vega de Granada con indicación y localización de las estaciones meteorológicas de precipitación y temperatura de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) utilizadas en el estudio
 Figure 1. Basins and sub-basins of the Cornisa-Vega de Granada water system with indication and location of meteorological stations for precipitation and temperature, belonging to Spain's Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), used in the study

El río Genil tiene una cuenca vertiente hasta la estación de aforos E-80 de 2.861,1 km² (Figura 2). Sus principales afluentes en el sistema hidrológico Cornisa-Vega de Granada son los ríos Darro, Aguas Blancas, Monachil y Dilar y los arroyos Salado y Noniles. La cabecera del río Genil se encuentra parcialmente regulada por el embalse de Quentar en el río Aguas Blancas y por la presa de Canales en el propio río Genil.

El río Cubillas es afluente del río Genil por su margen derecha y presenta una cuenca vertiente de 1.529,6 km². Nace en el acuífero de Sierra Arana, concretamente en los manantiales de Deifontes, y desemboca en el río Genil aguas abajo de la población de Fuente Vaqueros. Sus principales afluentes son el río Colomera y el arroyo de Charcón. Los ríos Cubillas y Colomera se encuentran parcialmente regulados, respectivamente, por los embalses de Cubillas y Colomera.

La cuenca del río Cacín, que es afluente del río Genil por su margen izquierda, abarca en el presente estudio una superficie de 380,7 km². El río se encuentra regulado parcialmente por el embalse de Bermejales.

En lo relativo a las aguas subterráneas, el Sistema hidrológico Cornisa-Vega de Granada está constituido por una serie de acuíferos (Figura 3), que en el presente trabajo se han agrupado según la antigua figura administrativa de Unidad Hidrogeológica (DGOH-ITGE, 1988), ya que en la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir, que es el ámbito administrativo y geográfico al que pertenecen las Unidades Hidrogeológicas del sistema hidrológico Cornisa-Vega de Granada, existe una total coincidencia entre éstas y la nueva figura administrativa de Masa de Agua Subterránea (CHG. 2005). Los acuíferos del Sistema hidrológico Cornisa-Vega de Granada son, con excepción del acuífero de la Vega de Granada que es de litología detrítica, carbonatados, permeables por fisuración y karstificación, y régimen piezométrico libre.

Los datos hidrogeológicos que sustentan el presente trabajo se han extraído de los siguientes proyectos, artículos y tesis doctorales: "Estudio hidrogeológico de un sector del subbético medio al este del río Colomera (Granada)" (Abril *et al.* 1983); "Estudio del comportamiento de un acuífero drenado por un manantial. Aplicación al caso del manantial de Deifontes (Granada)" (Fernández del Río y Sahuquillo, 1983); "Criterios actuales para la gestión conjunta de aguas superficiales y subterráneas" (Sahuquillo, 1985); "Estudio hidroquímico del acuífero de la Vega de Granada" (Castillo. 1986); "El embalse subterráneo de la Vega de Granada, uno de los más importantes de Andalucía" (Castillo, 1995); "Estimación de los recursos drenados por el acuífero

de la Vega de Granada al río Genil mediante el análisis de los hidrogramas de la estación de Puente Castilla (Granada, España)" (Adarve y Castillo, 1999); "Los acuíferos de la depresión de Granada y su Cornisa" (Luque *et al.*, 2002); "Primeros datos sobre la investigación de sectores favorables a una explotación sostenible en los acuíferos de Padúl-La Peza-Albuñuelas como apoyo al abastecimiento de los núcleos del entorno de la Vega de Granada (Andalucía)" (Fernández Chacón *et al.*, 2004) y "El acuífero de la Vega de Granada. Ayer y hoy (1966-2004)" (Castillo 2005).

Tratamiento de datos y calibración de las series generadas mediante la aplicación del modelo de Témex

Para la aplicación del modelo de Témex se ha dividido el sistema hidrológico objeto de análisis en 3 grandes cuencas, que se corresponden con los cursos de los ríos Genil, Cubillas y Cacín. Estas cuencas se han subdividido a su vez en 25 subcuencas (Tabla 1 y Figuras 1 y 2). En la cuenca de río Genil se han definido un total de 14 subcuencas, en el río Cubillas un total de 8 y en el río Cacín de 3. La delimitación de cuencas y subcuencas se ha realizado atendiendo a criterios hidrológicos, hidrogeológicos y de datos de aforos utilizables en la calibración del modelo de Témex.

Datos meteorológicos

El modelo de Precipitación-Aportación de Témex precisa que en cada una de las subcuencas, que componen el sistema hidrológico que se quiere estudiar, se conozcan sus datos meteorológicos. Estos se han asignado utilizando el método de los polígonos de Thiessen, que se definen a partir de las estaciones de precipitación y temperatura de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). En total se han utilizado 25 estaciones de precipitación, 12 de temperatura y 2 termoplumiométricas (Figura 1). El porcentaje de participación de cada estación meteorológica se ha establecido a partir del ratio que define la superficie de intersección del polígono de Thiessen con la divisoria de la subcuenca y la superficie total de la misma.

El tratamiento de las series climáticas y la metodología de trabajo que se ha seguido ha sido la siguiente: *Precipitaciones*

- Análisis previo de la información y selección de estaciones representativas.
- Contraste, corrección y completado de datos (correlación ortogonal).
- Definición y cálculo de años tipos (medios, secos y

húmedos) para el periodo 1951-2004. El análisis de la precipitación se ha operado a escala diaria y los resultados se han agrupado por meses y años.

Temperaturas

- Análisis previo de la información y selección de estaciones.

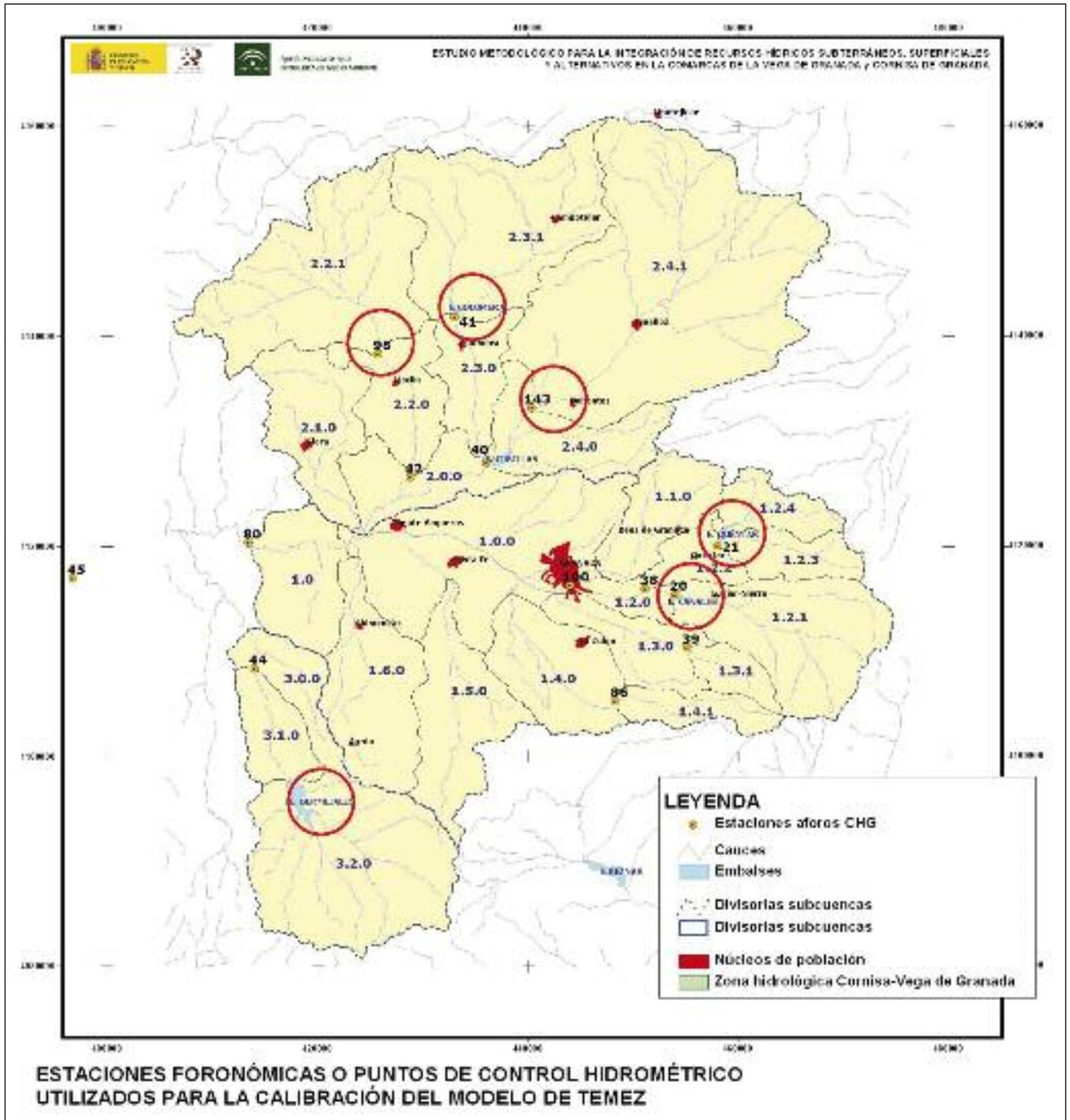


Figura 2. Estaciones foronómicas seleccionadas y utilizadas (sólo las rodeadas por un círculo) en la etapa de calibración del modelo de Témez

Figure 2. Gauging stations selected and used (only those circled) in the calibration stage of the Témez model

- Corrección y completado de datos (correlación ortogonal).

Evapotranspiración

El cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP) para la serie 1951-2004 se ha realizado a partir de los datos de las temperaturas medias mensuales y de la aplicación del método de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948 en Llamas y Galofré, 1976). Este método es casi totalmente empírico, ya que solo depende de la latitud y de la temperatura media diaria. Con relación a ésta última, aspecto determinante en dicho método, cabe indicar que el parámetro que más influye sobre la misma son las horas de sol, por lo que la radiación neta es el factor más importante que controla la evapotranspiración cuando ésta no está limitada por la disponibilidad de agua. La radiación neta diaria recibida en superficie no está correlacionada con la temperatura media diaria (Pelton *et al*, 1960 y Rosenberg *et al*, 1980 en Sole *et al*, 1995), pero sí con la temperatura media mensual, por lo que el método de Thornthwaite no puede evaluar la evapotranspiración diaria como función del día del mes, sino como función de la temperatura media mensual (Sole *et al*, 1995). A este respecto, cabe indicar que en la estimación de la ETP diaria se comete un menor error cuando se consideran los valores medios mensuales. Es decir, cuanto se toma la ETP diaria como ETP media mensual dividida por el número de días del mes (Martínez *et al*, 1995). La evapotranspiración potencial calculada por uno u otro procedimiento solo varía en un 0,2 por ciento (Padilla y Pulido, 1986) para el acuífero del río Adra y en un 0,23 por ciento (Murillo, 2004) para el acuífero cuaternario del río Guadalquivir entre Alcolea del Río y Sevilla, por lo que en el presente artículo no se ha calculado la evapotranspiración potencial a partir de las temperaturas de cada día, sino que ésta se ha estimado mediante el empleo de la temperatura media mensual, puesto que esta forma de operar resulta más sencilla a la par que más precisa. El cálculo de la evapotranspiración potencial se ha efectuado mediante el empleo del paquete HIDROBAS (Ortiz *et al*, 2001) que realiza los cálculos a escala mensual.

Datos morfométricos

El cálculo de la aportación en unidades L^3T^{-1} , mediante la aplicación del modelo de Témex, precisa que se defina la superficie de las formaciones permeables (afloramientos de los acuíferos) e impermeables (Tabla 1 y Figura 3), que corresponden a cada una de las subcuencas que se han establecido para el ámbito del estudio (Figura 1). Estas superficies se han defi-

nido a partir de la cartografía hidrogeológica contenida en el Atlas Hidrogeológico de Granada (DPG-ITGE, 1990), Atlas Hidrogeológico de Andalucía (IGME-JA, 1998) y mapa de permeabilidades 1:200.000 del IGME (IGME, 2006)), ya que la aplicación del modelo de Témex, por tratarse de un modelo agregado, no requiere de una mayor precisión. No obstante, cuando se ha estimado necesario se ha consultado la cartografía MAGNA del IGME a escala 1.50000.

Parámetros iniciales del modelo de Témex

El siguiente paso metodológico, una vez conocidas las superficies permeables e impermeables de cada una de las subcuencas, ha consistido en establecer los parámetros del modelo de Témex. La forma de operar se ha fundamentado en calcular un valor inicial, para cada uno de los parámetros, que respondiera a la realidad física de cada una de las subcuencas que se han modelado. Dicho valor se ha variado a lo largo de la etapa de calibración, siempre que han existido argumentos hidrogeológicos que lo han avalado.

El valor inicial de los parámetros de ajuste del modelo de Témex en las diferentes subcuencas en las que se ha subdividido el área de estudio, se ha establecido de acuerdo a los siguientes criterios:

- Infiltración máxima (I_{\max}). El valor inicial de calibración de la infiltración máxima (I_{\max}) se muestra en la tabla 2, y se ha establecido de acuerdo a la siguiente horquilla de valores: 300 mm/mes para los acuíferos mayoritariamente detríticos de permeabilidad alta, 450 mm/mes para los acuíferos detríticos de permeabilidad muy alta y los kársticos de permeabilidad alta, y 500 mm/mes para los acuíferos kársticos de permeabilidad muy alta. En las subcuencas donde el porcentaje de afloramientos permeables es nulo, la infiltración máxima (I_{\max}) se ha establecido en 100 mm/mes, ya que ningún material es totalmente impermeable, mientras que en las subcuencas en las que no prepondera ningún tipo de material ni de permeabilidad, el valor inicial de la I_{\max} se ha establecido de acuerdo al siguiente criterio de asignación ponderada:

$$I_{\text{máx},k} = \frac{1}{S_k} \sum_{i=1}^n (I_{\text{máx},i} \cdot S_i)$$

donde:

$I_{\text{máx},k}$ valor del parámetro $I_{\text{máx}}$ que se asigna a la subcuenca k-ésima.

$I_{\text{máx},i}$ valor del parámetro $I_{\text{máx}}$ en cada una de las

SUBCUENCAS		α	H_{max}	I_{max}	C	H_o (mm)	Q_o (l/s)
		(días ⁻¹)	(mm/mes)	(mm/mes)			
1.0	Bajo Genil (Vega de Granada)	0,0045	213	412	0,50	0	51
1.0.0	Genil (Vega de Granada)	0,0017	239	313	0,50	0	1004
1.1.0	Darro	0,0045	200	400	0,35	0	322
1.2.0	Genil (Sª Nevada)	0,0035	150	500	0,30	0	18
1.2.1	Alto Genil (Canales)	0,0035	150	500	0,30	0	159
1.2.2	Bajo Aguas Blancas	0,0045	150	500	0,30	0	79
1.2.3	Aguas Blancas-Los Padules	0,0040	150	500	0,30	0	187
1.2.4	Alto Aguas Blancas (Quéntar)	0,0042	150	500	0,30	0	304
1.3.0	Bajo Monachil	0,0030	177	445	0,35	0	385
1.3.1	Alto Monachil	0,0035	150	500	0,30	0	58
1.4.0	Bajo Dilar	0,0018	237	326	0,50	0	307
1.4.1	Alto Dilar	0,0035	150	500	0,30	0	139
1.5.0	Arroyo del Salado	0,0015	250	300	0,50	0	229
1.6.0	Arroyo del Noniles	0,0015	250	300	0,50	0	172
2.0.0	Cubillas Bajo	0,0015	250	300	0,50	0	242
2.1.0	Arroyo del Charcón	0,0056	212	383	0,35	0	300
2.2.0	Bajo Velillos	0,0065	250	450	0,35	0	183
2.2.1	Alto Velillos	0,0085	200	100	0,30	0	0
2.3.0	Bajo Colomera	0,0065	250	450	0,35	0	119
2.3.1	Río de Las Juntas (Embalse de Colomera)	0,0065	250	467	0,35	0	326
2.4.0	Bermejo-Embalse Cubillas	0,0050	148	452	0,30	0	105
2.4.1	Cubillas-Deifontes	0,0037	164	527	0,30	0	1374
3.0.0	Bajo Cacán	0,0085	200	100	0,30	0	0
3.1.0	Alto Cacán (Embalse de Bermejales)	0,0085	200	100	0,30	0	0
3.2.0	Cacán (Bermejales)	0,0035	156	494	0,30	0	949

Tabla 2. Parámetros iniciales del modelo de Témez
 Table 2. Initials parameters of the Témez model

porciones i -ésimas de superficie (S_i) que forman parte de la subcuenca k -ésima de superficie (S_k).

b) Capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo (H_{max}). El valor inicial de calibración de la capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo (tabla 2) se ha establecido de acuerdo a las características edafológicas de los suelos y a la pendiente del terreno. En relación con las primeras se distinguen dos grandes grupos:

- Los suelos profundos y muy desarrollados que se localizan sobre materiales aluviales y detríticos de la Vega de Granada y su entorno inmediato.
- Los suelos que se desarrollan sobre el macizo de Sierra Nevada, que se pueden dividir en dos grandes bloques, por un lado los ligados a la

orla carbonatada y, por otro, los vinculados al núcleo cristalino. Estos últimos presentan un escaso desarrollo, dada la topografía accidentada del terreno sobre el que se localizan, mientras que en orla carbonatada coexisten suelos con muy distinto grado de desarrollo.

Las pendientes del terreno se han obtenido a partir de un modelo Digital de Elevación (MDE) de 100x100 m. En la tabla 3 se muestra la horquilla de variación del valor inicial de calibración de la capacidad máxima de retención de agua en el suelo.

En las subcuencas en las que se ha considerado que no prepondera ninguna tipología de suelo ni de pendiente del terreno, el valor inicial de H_{max} se ha establecido de acuerdo al siguiente criterio de asignación ponderada:

Suelos ligados a:	Grado de desarrollo del suelo	Pendiente promedio (%)		
		< 5%	5 – 15 %	> 15 %
Afloramientos aluviales y detriticos	Alto	250	200	150
Afloramientos de la orla carbonatada y núcleo cristalino	Escaso	150	100	75
	Alto	200	150	100

Tabla 3. Horquilla de variación del valor inicial de calibración de la capacidad máxima de retención de agua en el suelo (mm)
 Table 3. Variation range for the initial calibration value of the parameter "maximum water retention capacity in the soil" (mm)

$$H_{\text{máx},k} = \frac{1}{S_k} \sum_{i=1}^N (H_{\text{máx},i} \cdot S_i)$$

donde:

- $H_{\text{máx},k}$ valor del parámetro $H_{\text{máx}}$ que se asigna a la subcuenca k-ésima.
- $H_{\text{máx},i}$ valor del parámetro $H_{\text{máx}}$ en cada una de las porciones i-ésimas de superficie (S_i) que forman parte de la subcuenca k-ésima de superficie (S_k).
- c) El coeficiente de agotamiento (α) del acuífero, que regula el drenaje subterráneo en el modelo de Témex, es el parámetro al que se le ha otorgado una mayor credibilidad de entre los cuatro ($H_{\text{máx}}$, C , $I_{\text{máx}}$ y α) que contempla el modelo, pues se ha obtenido a partir de medidas directas realizadas en ríos y manantiales. Esta es la razón por la que se ha priorizado su valor inicial a lo largo de todo el proceso de calibración. Esta forma de proceder ha permitido operara dicho proceso desde la señal de salida (drenaje subterráneo), que es la mejor conocida, y centrar la calibración en los parámetros del suelo ($H_{\text{máx}}$ y C) y en la infiltración máxima ($I_{\text{máx}}$) que resultan más desconocidos e inciertos. En la tabla 2 se muestra el valor inicial de calibración para el coeficiente de agotamiento (α) del acuífero.
- d) Los valores iniciales de calibración que se han tomado para el factor C se muestra en la tabla 2, y se ha establecido de acuerdo a la siguiente horquilla de valores: 0,30 para las cuecas altas con acuíferos carbonatados, suelos poco desarrollados, pendientes elevadas, escasa vegetación e importante red de drenaje; 0,35 para cuencas con pendientes y desarrollo de la red de drenaje, vegetación y suelo de tipo medio; y 0,50 para las cuencas bajas ligadas a acuíferos detriticos, escasa pendiente, suelos muy desarrollados y numerosos campos de cultivo.
- e) Los valores correspondientes a las condiciones iniciales se han establecido para (Q_0) mediante el

análisis de hidrogramas en estaciones representativas del sistema y la posterior asignación del valor correspondientes al final del estiaje (tabla 2). En lo que respecta al valor inicial del parámetro H_0 , dado que las simulaciones se realizan para un año hidrológico completo y se inician y finalizan con el estiaje, se ha considerado nulo.

Calibración de las series de escorrentía generadas mediante la aplicación del modelo de Témex

En la Tabla 4 se relacionan las estaciones de aforo, que inicialmente se seleccionaron para abordar la etapa de calibración de las series de escorrentía generadas mediante la aplicación del modelo de Témex. Todas ellas corresponden a estaciones de aforo operadas por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG) en la cuenca alta y media del río Genil. En la figura 2 se muestra la localización de estas estaciones de aforo.

Una vez analizados los datos de aforo correspondientes las estaciones foronómicas que se muestran en la Tabla 4 se pudo comprobar que los datos de las estaciones de aforos E-38, E-40, E-44, E-80 y E-100 registraban caudales en régimen influenciado, que no se podían restituir al régimen natural, y los correspondientes a las estaciones de aforos E-39, E-42 y E-86 importantes deficiencias en los caudales medidos, que imposibilitaban su uso en la etapa de calibración del modelo de Témex para ciertos años del periodos de control, que abarca desde el año 1951 hasta el año 2004. Los datos de aforo que se han utilizado en la calibración del modelo de Témex han sido los correspondientes a las estaciones foronómicas del embalse de Quéntar (E-21), embalse de Canales (E-20), embalse de los Bermejales (E-44b), embalse de Colomera (E-41), Estación de aforos de Velillos (E-95) y Manantial de Deifontes (E-143). En estas estaciones se puede suponer con bastante aproximación que la

Estación de aforos		Coordenadas UTM		Cuenca vertiente (km ²)	Aportación mensual (hm ³ /mes)		Aportación mensual específica (hm ³ /mes/km ²)	
Código	Cauce	X	Y		Medio	Máxima	Medio	Máxima
E-20	GENIL	457120	457120	178	6,58	76,98	0,0369	0,4325
E-21	AGUAS BLANCAS	461645	461645	51	0,66	3,24	0,0037	0,0182
E-38	AGUAS BLANCAS	454330	454330	139	1,69	18,17	0,0095	0,1021
E-39	MÓNACHIL	458291	458291	48	3,50	95,41	0,0197	0,5360
E-40	CUBILLAS	439232	439232	620	8,65	39,00	0,0486	0,2191
E-41	COLOMERA	436221	436221	246	2,00	52,39	0,0112	0,2943
E-42	FRAILES (Bajo Velillos)	431984	431984	357	5,93	48,49	0,0333	0,2724
F-44	CACÍN	417170	417170	340	5,55	23,21	0,0312	0,1304
E-44b	EMBALSE DE BERMEJALES			266,9	5,36	14,51	0,0201	
E-80	GENIL	416587	416587	2944	19,61	168,60	0,1102	0,5472
E-86	DILAR	451489	451489	41	2,15	13,06	0,0121	0,0734
E-95	VELILLOS	428935	428935	168	2,87	25,05	0,0161	0,1407
E-100	GENIL	447177	447177	525	2,29	20,24	0,0129	0,1137
E-143	MANANTIAL DE DEIFONTES			108 (sólo afloramientos permeables)	2,38	3,58	0,0220	

Tabla 4. Estaciones de aforo seleccionadas inicialmente para la calibración del modelo de Témex
 Table 4. Gauge stations selected initially to calibrate the Témex model

aportación registrada es la natural, ya que sólo se ven afectadas por pequeñas tomas de carácter local, que abastecen pequeños municipios y urbanizaciones residenciales, que retornan la mayor parte del caudal que derivan.

La bondad del ajuste realizado entre la serie generada mediante el modelo de Témex y la serie hidro-

métrica medida en campo se ha evaluado mediante la determinación del coeficiente de correlación mensual y anual de ambas series de datos (Tabla 5). En la correlación de la serie mensual se obtienen resultados razonables en las estaciones E-21 (Embalse de Quéntar), E-41 (Embalse de Colomera), E-44b (Embalse de Bermejales), E-95 (Velillos) y E-143

Sección calibración		Cauce	Subcuencas		Porcentaje de correlación para la serie mensual	Porcentaje de correlación para la serie anual
E-21	Embalse de Quéntar	Aguas Blancas	1.2.3	Aguas Blancas-Los Padules	0,738	0,834
			1.2.4	Alto Aguas Blancas (Quéntar)		
			Suma			
E-20	Embalse de Canales	Genil	1.2.1	Alto Genil (Canales)	0,472	0,784
E-44b	Embalse de Bermejales	Cacín	3.2.0	Cacín (Bermejales)	0,865	0,962
E-41	Embalse de Colomera	Rio Las Juntas	2.3.1	Río de Las Juntas (Embalse de Colomera)	0,821	0,848
E-95	Velillos	Velillos	2.2.1	Alto Velillos	0,764	0,517
E-143	Manantial de Deifontes	Descarga del Acuífero de Sierra Arana	2.4.1	Cubillas-Deifontes	0,747	0,840

Tabla 5. Coeficiente de correlación mensual y anual que presentan las series generadas mediante el modelo de Témex y las series hidrométricas medidas en campo
 Table 5. Monthly and annual correlation coefficients of the series generated using the Témex model and the hydrometric series measured in the field

(Manantial de Deifontes). En la correlación de la serie anual los resultados se consideran aceptables en las estaciones E-21 (Embalse de Quéntar), E-41 (Embalse de Colomera), E-44b (Embalse de Bermejales) y E-143 (Manantial de Deifontes). Aunque no figura en la tabla 4 también se obtiene un buen coeficiente de correlación (0,82) en la estación E-42 (Bajo Velillos) para la serie mensual.

En la figura 4 se muestran gráficamente los resultados de la calibración del modelo de Témez en las estaciones de control foronómico E-21 (Embalse de Quéntar), E-20 (Embalse de Canales), E-44b (Embalse de Bermejales), E-95 (Velillos) y E-143 (Manantial de Deifontes). Los gráficos situados a la izquierda muestran la calibración efectuada para la serie anual, mientras que los localizados a la derecha corresponde a la serie mensual. En dichos gráficos se puede observar, con excepción del manantial de Deifontes, la escasa disponibilidad de datos medidos en campo frente a los generados sintéticamente. Éste es uno de los principales problemas con los que se enfrentan los modelos de uso conjunto. Esta falta de datos atañe principalmente a las series de control de la escorrentía subterránea, aunque en el presente artículo sucede lo contrario, ya que se dispone de un mayor número de datos en la descarga subterránea del manantial de Deifontes, que en el resto de estaciones foronómicas que controlan la escorrentía total.

El valor final que se ha obtenido para los parámetros de Témez en cada una de las subcuencas analizadas, una vez concluida la etapa de calibración del modelo, se muestra en la Tabla 6. En la misma se puede observar que los valores iniciales que se han tomado para la infiltración máxima (I_{max}) han resultado ser en general muy superiores a los obtenidos al final de la etapa de calibración. No ha sucedido lo mismo con la capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo (H_{max}) ni con el factor C, que son muy semejantes o iguales, salvo excepciones, a los adoptados inicialmente. Por lo que respecta al coeficiente de agotamiento (α) del acuífero no se ha variado el valor inicial del mismo a lo largo de toda la calibración.

Análisis, discusión y presentación de resultados

El modelo de Témez proporciona la escorrentía total en régimen natural, que se registra en una determinada cuenca hidrológica, separando la componente superficial de la subterránea. En las tablas 7, 8 y 9 se muestra la distribución del valor medio de la escorrentía total, superficial y subterránea a escala mensual y anual en cada una de las subcuencas en que se

ha subdividido el sistema hidrológico Cornisa-Vega de Granada.

Para el conjunto del sistema hidrológico Cornisa-Vega de Granada se ha determinado, mediante la aplicación del modelo de Témez, que el valor medio de la escorrentía total asciende a 569,34 hm³/año, la escorrentía superficial estricta a 389,50 hm³/año (68,41% de la escorrentía total) y la escorrentía subterránea a 179,84 hm³/año (31,59 % de la escorrentía total).

En la tabla 10 se muestra el análisis realizado mediante ajuste de la función de Goodrich a la serie hidrológica generada a partir de la aplicación del modelo de Témez, así como los estadísticos más representativos. En dicha tabla se observa que la escorrentía total para un año tipo medio asciende a 552,24 hm³, para el año tipo seco a 222,57 hm³ y para el año tipo húmedo a 1.002,35 hm³, mientras que la descarga de los acuíferos a los ríos del sistema Cornisa-Vega de Granada se eleva a 179,81 hm³ para un año tipo medio, a 99,86 hm³ para un año tipo seco y a 267,15 hm³ para un año tipo húmedo. El año tipo medio se ha definido para un valor de precipitación comprendido entre 132,9 y 366,6 mm/año, el año seco para un rango de precipitación de 297,4 a 628,1 mm/año y el año húmedo para el intervalo de precipitación que varía entre 515,4 a 1224,86 mm/año.

Para un año tipo húmedo la escorrentía superficial es 2,75 veces la escorrentía subterránea, para uno tipo medio 2,07 y para uno tipo seco 1,23. La escorrentía subterránea en un año tipo húmedo constituye el 26,7% de la escorrentía total, en un año tipo medio el 32,6% y en un año tipo seco el 44,9%. De la anterior observación se desprende que la escorrentía superficial es preponderante en los años de tipología húmeda, mientras que la escorrentía subterránea adquiere un notable peso e importancia en los años de tipología climática seca, ya que en este tipo de año la escorrentía subterránea es casi la mitad de la escorrentía total, mientras que en los medio es un tercio y en los húmedos un cuarto.

A escala mensual la escorrentía superficial y subterránea que se genera en los meses de verano e invierno presenta cuantías muy diferentes. Así, si el análisis se realiza para los meses de verano (julio, agosto y septiembre) la escorrentía subterránea representa el 94 % de la escorrentía total. El máximo porcentaje de escorrentía subterránea se alcanza en los meses de agosto y septiembre, con un caudal de agua subterránea circulando por los ríos del sistema igual al 97% de la escorrentía total. En cambio, si el análisis se realiza para los meses invernales (enero, febrero y marzo) la escorrentía subterránea sólo

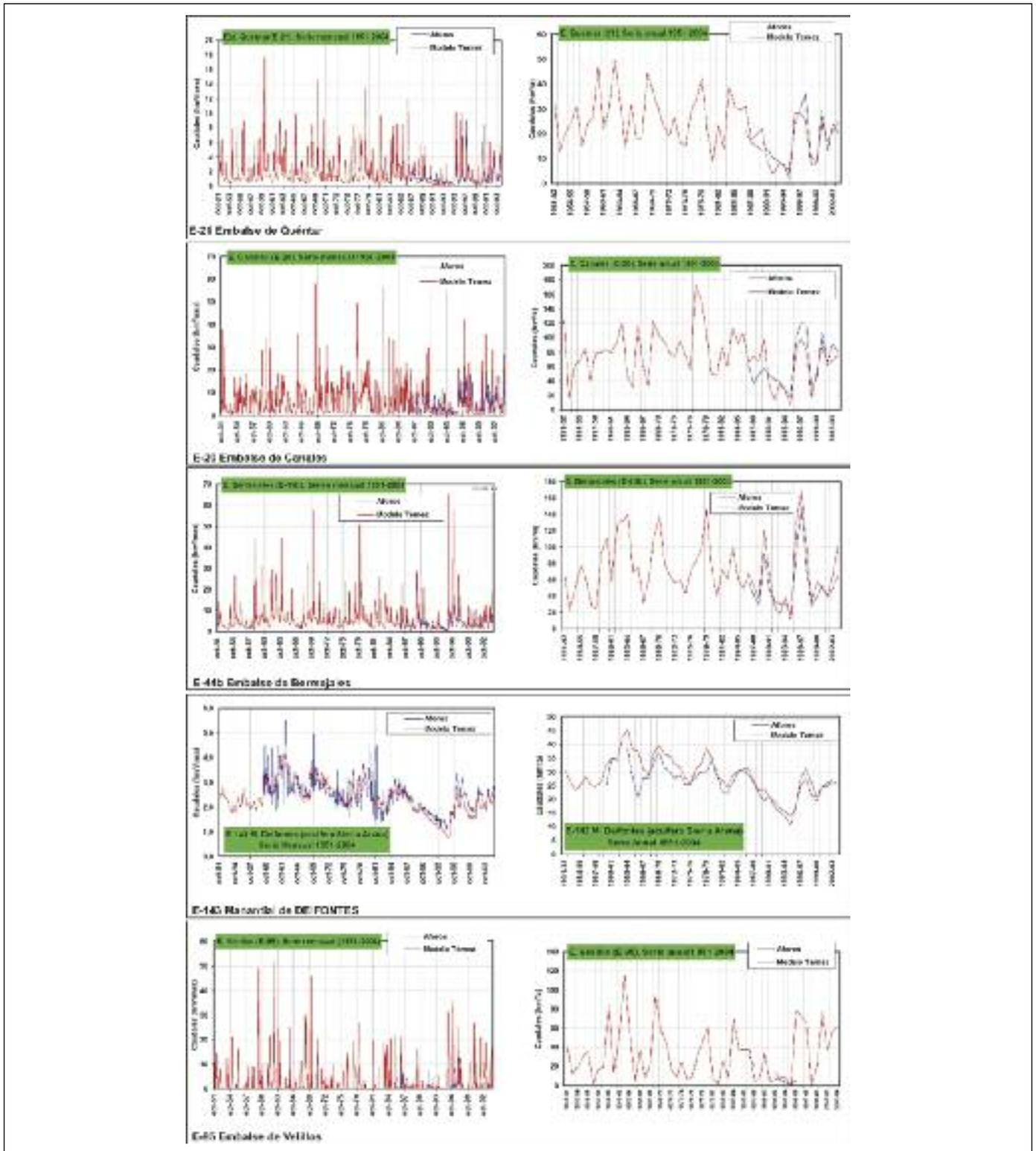


Figura 4. Resultados de la calibración del modelo de Temez en las estaciones de control foronómico E-21 (Embalse de Quéntar), E-20 (Embalse de Canales), E-44b (Embalse de Bermejales), E-95 (Velillos) y E-143 (Manantial de Deifontes). Los gráficos situados a la izquierda muestran la calibración efectuada para la serie anual, mientras que los localizados a la derecha corresponde a la serie mensual
 Figure 4. Results of calibrating the Temez model at the gauge stations E-21 (Quéntar reservoir), E-20 (Canales reservoir), E-44b (Bermejales reservoir), E-95 (Velillos) and E-143 (Deifontes spring). Graphs on the left show the calibration made for the annual series, whereas those on the right correspond to the monthly series

SUBCUENCAS		Valor inicial de $H_{m\acute{a}x}$	Valor de calibración de $H_{m\acute{a}x}$	Valor inicial de $I_{m\acute{a}x}$	Valor de calibración de $I_{m\acute{a}x}$	Valor inicial del factor C	Valor de calibración del factor C
		(mm/mes)	(mm/mes)	(mm/mes)	(mm/mes)		
1.0	Bajo Genil (Vega de Granada)	213	209	412	103	0,50	0,35
1.0.0	Genil (Vega de Granada)	239	238	313	158	0,50	0,48
1.1.0	Darro	200	199	400	178	0,35	0,35
1.2.0	Genil (S ^o Nevada)	150	149	500	148	0,30	0,30
1.2.1	Alto Genil (Canales)	150	150	500	205	0,30	0,30
1.2.2	Bajo Aguas Blancas	150	150	500	176	0,30	0,30
1.2.3	Aguas Blancas-Los Padules	150	150	500	171	0,30	0,30
1.2.4	Alto Aguas Blancas (Quéntar)	150	150	500	176	0,30	0,30
1.3.0	Bajo Monachil	177	177	445	128	0,35	0,35
1.3.1	Alto Monachil	150	150	500	224	0,30	0,30
1.4.0	Bajo Dilar	237	235	326	99	0,50	0,47
1.4.1	Alto Dilar	150	150	500	195	0,30	0,30
1.5.0	Arroyo del Salado	250	247	300	80	0,50	0,50
1.6.0	Arroyo del Noniles	250	248	300	72	0,50	0,50
2.0.0	Cubillas Bajo	250	249	300	95	0,50	0,50
2.1.0	Arroyo del Clarcón	212	211	383	136	0,35	0,38
2.2.0	Bajo Velillos	250	249	450	139	0,35	0,35
2.2.1	Alto Velillos	200	199	100	66	0,30	0,30
2.3.0	Bajo Colomera	250	249	450	120	0,35	0,35
2.3.1	Río de Las Juntas (Embalse de Colomera)	250	249	467	150	0,35	0,35
2.4.0	Bermejo-Embalse Cubillas	148	147	452	148	0,30	0,32
2.4.1	Cubillas-Deifontes	164	163	527	150	0,30	0,33
3.0.0	Bajo Cacin	200	194	100	53	0,30	0,30
3.1.0	Alto Cacin (Embalse de Bermejales)	200	192	100	53	0,30	0,30
3.2.0	Cacin (Bermejales)	156	154	494	217	0,30	0,31

Tabla 6. Valor inicial y final de calibración de la infiltración máxima ($I_{m\acute{a}x}$), capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo ($H_{m\acute{a}x}$) y factor C

Table 6. Initials and finals calibration parameters of the Témex model for each one of the sub-basins of the Cornisa-Vega de Granada water system

represente el 22,5 % de la escorrentía total. En el mes de febrero se alcanza el mínimo de escorrentía subterránea (20 % de la escorrentía total). Todos estos resultados se muestran gráficamente en la figura 5, donde se aprecia que la escorrentía subterránea es la única que en los meses estivales puede proporcionar en los ríos no regulados por embalses el caudal ecológico o ambiental necesario.

Conclusiones

La aplicación del modelo de Témex ha permitido determinar en las subcuencas que conforman el sistema hidrológico Cornisa-Vega de Granada, para un periodo de 53 años y con una escala de tiempo mensual, la serie de aportación en régimen natural de la escorrentía total, superficial y subterránea (Tabla 7, 8 y 9).

SUBCUENCAS	Escorrentía Total (hm ³ /mes)												ANUAL (hm ³)
	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	
1.0 Bajo Genil (Vega de Granada)	0,14	0,18	0,75	1,01	1,32	1,30	0,80	0,65	0,06	0,03	0,03	0,03	6,30
1.0.0 Genil (Vega de Granada)	2,60	3,51	5,97	8,74	11,61	10,86	9,96	6,52	3,15	2,73	2,60	2,48	70,75
1.1.0 Darro	0,92	1,42	2,25	2,95	3,79	3,55	3,29	2,21	1,13	0,90	0,79	0,73	23,93
1.2.0 Genil (S ^a Nevada)	0,18	0,27	0,53	0,63	0,75	0,77	0,56	0,32	0,02	0,00	0,00	0,01	4,05
1.2.1 Alto Genil (Canales)	3,90	7,17	8,15	6,35	7,42	9,42	10,36	10,23	6,71	2,47	1,40	1,31	74,90
1.2.2 Bajo Aguas Blancas	0,34	0,69	1,26	1,57	1,78	1,77	1,53	0,94	0,22	0,11	0,10	0,10	10,41
1.2.3 Aguas Blancas-Los Padules	0,51	0,85	1,51	1,87	2,14	2,16	1,93	1,33	0,54	0,39	0,34	0,31	13,89
1.2.4 Alto Aguas Blancas (Quéntar)	0,44	0,54	0,86	1,07	1,29	1,27	1,17	0,91	0,61	0,52	0,45	0,40	9,53
1.3.0 Bajo Monachil	0,54	0,62	0,85	1,03	1,26	1,40	1,25	1,03	0,64	0,56	0,51	0,47	10,16
1.3.1 Alto Monachil	0,59	1,17	1,22	0,73	0,88	1,28	1,52	1,67	1,20	0,34	0,10	0,10	10,80
1.4.0 Bajo Dílar	0,39	0,47	0,75	1,04	1,33	1,36	1,14	0,99	0,52	0,49	0,45	0,41	9,34
1.4.1 Alto Dílar	0,44	0,94	1,31	1,08	1,22	1,53	1,43	1,27	0,61	0,12	0,03	0,04	10,01
1.5.0 Arroyo del Salado	0,08	0,14	0,47	0,78	0,74	0,70	0,56	0,43	0,09	0,08	0,08	0,08	4,24
1.6.0 Arroyo del Naniés	0,05	0,09	0,35	0,53	0,64	0,58	0,28	0,29	0,05	0,05	0,05	0,04	3,00
2.0.0 Cubillas Bajo	0,01	0,04	0,34	0,53	0,76	0,65	0,51	0,34	0,02	0,00	0,00	0,00	3,20
2.1.0 Arroyo del Charcón	0,35	0,65	1,91	2,61	2,94	2,64	1,84	1,37	0,39	0,24	0,20	0,18	15,32
2.2.0 Bajo Velillos	0,23	0,45	1,14	1,73	1,90	1,75	1,32	1,13	0,43	0,23	0,19	0,16	10,66
2.2.1 Alto Velillos	0,77	1,57	4,85	5,48	6,83	5,76	4,43	2,87	0,28	0,00	0,00	0,01	32,85
2.3.0 Bajo Colomera	0,15	0,26	0,79	1,06	1,33	1,17	0,96	0,74	0,23	0,12	0,10	0,09	7,00
2.3.1 Río de Las Juntas (Emb.Colomera)	0,62	1,19	4,16	5,02	7,18	5,67	3,64	3,06	0,72	0,46	0,38	0,34	32,45
2.4.0 Bermejo-Embalse Cubillas	0,76	1,37	2,68	3,04	3,64	3,16	2,86	1,58	0,39	0,20	0,17	0,21	20,05
2.4.1 Cubillas-Deifontes	5,20	6,60	14,13	13,76	16,73	15,98	11,93	8,75	4,55	3,88	3,60	3,49	108,59
3.0.0 Bajo Cacin	0,08	0,13	0,43	0,54	0,58	0,43	0,37	0,23	0,01	0,00	0,00	0,01	2,79
3.1.0 Alto Cacin (emb. Bermejales)	0,11	0,18	0,44	0,65	0,57	0,50	0,41	0,21	0,01	0,00	0,00	0,00	3,08
3.2.0 Cacin (Bermejales)	3,93	5,90	9,41	9,63	8,64	8,44	7,14	5,36	3,99	3,53	3,18	2,93	72,05
Sistema Cornisa-Vega de Granada	23,32	36,40	66,52	73,43	87,26	84,11	71,19	54,42	26,59	17,45	14,74	13,91	569,34

Tabla 7. Distribución del valor medio de la escorrentía total a escala mensual (hm³/mes) y anual (hm³/año) en cada una de las subcuencas del sistema hidrológico Cornisa-Vega de Granada

Table 7. Distribution of the average total runoff value per month (hm³/month) and annually (hm³/year) in each one of the sub-basins into which the water system of Cornisa-Vega de Granada has been divided

Los resultados que proporciona el modelo se encuentran condicionados tanto por los datos de partida como por los utilizados durante la etapa de calibración, que son escasos en su número y deficientes en su calidad, por lo que se encuentran afectados de un cierto grado de incertidumbre, que proviene no solo del caudal que se registra en las estaciones de control foronómico e hidrométrico, sino también de otra serie de variables que condicionan el proceso de infiltración.

En lo referente a las estaciones de aforo cabe indicar que aproximadamente la mitad de ellas o bien registran caudales en régimen influenciado, que no se pueden restituir al régimen natural, o bien presentan importantes deficiencias en las medidas realizadas, que las inhabilitan como elemento de calibración y control. Por lo que respecta a la otra mitad, aunque

se les supone régimen no influenciado, se encuentran afectadas por pequeñas represas, centrales hidroeléctricas, derivaciones de índole municipal, tomas de carácter local y bombeos de reducida cuantía, que, aunque retornan un alto porcentaje del caudal que captan, desvirtúan en mayor o menor grado el funcionamiento natural que se les atribuye en el presente artículo. Estas apreciaciones afectarían a cualquier código hidrológico que se hubiera utilizado para calcular la escorrentía superficial y subterránea en régimen natural.

Dado que las estaciones de aforo, cuyo régimen de funcionamiento se asimila al natural, se localizan en los embalses del sistema o aguas arriba de los mismos, los resultados que proporciona el modelo de Témez pueden catalogarse de aceptables en las cuencas alta y media de los ríos del sistema hasta la orla

SUBCUENCAS	Escurrentía Superficial (hm ³ /mes)												ANUAL (hm ³)
	oct	nov	díc	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	
1.0 Bajo Genil (Vega de Granada)	0,11	0,16	0,73	0,98	1,28	1,26	0,76	0,61	0,02	0,00	0,00	0,00	5,91
1.0.0 Genil (Vega de Granada)	0,22	1,21	3,68	6,38	8,08	8,16	7,11	3,60	0,29	0,00	0,00	0,01	39,75
1.1.0 Darro	0,28	0,77	1,55	2,17	2,80	2,56	2,22	1,12	0,12	0,00	0,00	0,02	13,69
1.2.0 Genil (S ^a Nevada)	0,18	0,27	0,53	0,63	0,75	0,77	0,56	0,32	0,02	0,00	0,00	0,01	4,05
1.2.1 Alto Genil (Caneles)	3,06	6,34	7,28	6,44	6,44	8,36	8,23	9,04	5,54	1,37	0,40	0,41	62,62
1.2.2 Bajo Aguas Blancas	0,27	0,61	1,18	1,47	1,67	1,65	1,40	0,80	0,09	0,00	0,00	0,02	9,16
1.2.3 Aguas Blancas-Los Padules	0,24	0,59	1,22	1,54	1,77	1,73	1,47	0,85	0,09	0,00	0,00	0,01	9,60
1.2.4 Alto Aguas Blancas (Quéntar)	0,08	0,19	0,48	0,65	0,80	0,71	0,55	0,28	0,03	0,00	0,00	0,00	3,77
1.3.0 Bajo Monachil	0,10	0,19	0,42	0,57	0,76	0,84	0,64	0,40	0,03	0,00	0,00	0,00	3,66
1.3.1 Alto Monachil	0,59	1,17	1,22	0,73	0,88	1,26	1,52	1,67	1,20	0,34	0,10	0,10	10,80
1.4.0 Bajo Dílar	0,01	0,09	0,35	0,63	0,89	0,80	0,64	0,46	0,00	0,00	0,00	0,00	3,98
1.4.1 Alto Dílar	0,44	0,94	1,31	1,09	1,22	1,53	1,43	1,27	0,81	0,12	0,03	0,04	10,01
1.5.0 Arroyo del Salado	0,00	0,06	0,36	0,69	0,66	0,62	0,47	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	3,23
1.6.0 Arroyo del Nardos	0,00	0,04	0,30	0,48	0,59	0,53	0,23	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	2,42
2.0.0 Cubillas Bajo	0,01	0,04	0,34	0,53	0,76	0,65	0,51	0,34	0,02	0,00	0,00	0,00	3,20
2.1.0 Arroyo del Charcón	0,19	0,50	1,75	2,41	2,89	2,35	1,53	1,06	0,12	0,00	0,00	0,01	12,61
2.2.0 Bajo Veñiles	0,09	0,33	1,00	1,55	1,87	1,48	1,03	0,83	0,16	0,00	0,00	0,01	8,16
2.2.1 Alto Veñiles	0,77	1,57	4,85	5,48	6,83	5,76	4,43	2,87	0,28	0,00	0,00	0,01	32,85
2.3.0 Bajo Colomera	0,08	0,20	0,71	0,97	1,21	1,03	0,80	0,58	0,08	0,00	0,00	0,00	5,85
2.3.1 Río de Las Juntas (Emb. Colomera)	0,34	0,94	3,87	4,64	5,68	5,07	3,01	2,44	0,16	0,00	0,00	0,02	27,16
2.4.0 Bermejo-Embalse Cubiles	0,82	1,23	2,53	2,86	3,44	2,83	2,61	1,32	0,16	0,00	0,00	0,06	17,76
2.4.1 Cubillas-Dañantes	1,85	3,38	10,74	10,08	12,78	11,71	7,51	4,36	0,37	0,00	0,00	0,12	63,00
3.0.0 Bajo Cañín	0,08	0,13	0,43	0,54	0,58	0,43	0,37	0,23	0,01	0,00	0,00	0,01	2,79
3.1.0 Alto Cañín (emb. Bermejales)	0,11	0,18	0,44	0,65	0,57	0,50	0,41	0,21	0,01	0,00	0,00	0,00	3,08
3.2.0 Cañín (Bermejales)	1,25	3,14	6,33	6,14	4,81	4,31	2,86	1,15	0,06	0,00	0,00	0,06	30,12
Sistema Cornisa-Vega de Granada	11,04	24,27	53,65	59,28	71,69	67,11	53,26	36,41	9,49	1,83	0,53	0,93	389,50

Tabla 8. Distribución del valor medio de la escurrentía superficial a escala mensual (hm³/mes) y anual (hm³/año) en cada una de las subcuencas del sistema hidrológico Cornisa-Vega de Granada

Table 8. Distribution of the average value for monthly surface runoff (hm³/month) and annually (hm³/year) in each one of the sub-basins into which the Cornisa-Vega de Granada water system has been divided

carbonatada. Por lo que respecta al curso bajo de los ríos del sistema no es posible valorar, solo mediante comparación de las series generadas por el modelo con las medidas en las estaciones de aforo, la bondad de los resultados obtenidos.

Entre los factores que condicionan el proceso de infiltración se encuentra la caracterización de la pluviometría, que debido a la carencia de estaciones meteorológicas en las zonas de mayor elevación, no es capaz de representar el incremento de precipitación ligado al efecto orográfico a que da lugar una topografía compleja y sumamente desnivelada, como la presente en un territorio tan vasto y extenso como el analizado.

A lo anterior cabe añadir que el modelo no tiene en cuenta la intensidad de la precipitación, que es un dato determinante en el cálculo de la infiltración. A este respecto cabe indicar que el modelo de Témez, al igual que otros muchos, considera por razones opera-

tivas, que la precipitación se distribuye uniformemente a lo largo del periodo de tiempo con el que trabaja (en la presente aplicación un mes), aun cuando ésta se haya producido en pocas horas, por lo que no tiene sentido establecer límites para el parámetro infiltración máxima, que contemple un periodo de tiempo inferior al mes, ni otros aspectos tales como distribución y variabilidad de la intensidad con la que tienen lugar la precipitación a lo largo del mes. Esta forma de proceder origina que se sobrestime la infiltración y se subestime la escurrentía superficial. Si el paso de tiempo hubiera sido el día también cabría realizar una consideración parecida. Solo los códigos que emplean un paso de tiempo horario tienen en consideración el efecto debido a la variabilidad de la intensidad con la que puede tener lugar la precipitación.

El problema de falta de datos, que es ajeno a los autores del presente artículo, proporciona unos resultados que tienen sus lógicas limitaciones, aunque no

SUBCUENCAS	Escorrentía Subterránea (hm ³ /mes)												ANUAL (hm ³)	
	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep		
1.0	Bajo Genil (Vega de Granada)	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,39
1.0.0	Genil (Vega de Granada)	2,38	2,30	2,29	2,37	2,52	2,70	2,85	2,93	2,87	2,73	2,60	2,47	30,98
1.1.0	Daro	0,66	0,65	0,70	0,78	0,89	1,00	1,07	1,09	1,02	0,90	0,79	0,71	10,25
1.2.0	Genil (S ^a Nueva)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.2.1	Alto Genil (Canales)	0,84	0,83	0,87	0,82	0,88	1,06	1,13	1,19	1,17	1,10	1,00	0,90	11,99
1.2.2	Bajo Aguas Blancas	0,08	0,06	0,06	0,09	0,11	0,12	0,13	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09	1,25
1.2.3	Aguas Blancas-Los Padijales	0,27	0,28	0,28	0,33	0,38	0,43	0,47	0,45	0,45	0,39	0,34	0,30	4,38
1.2.4	Alto Aguas Blancas (Quéntar)	0,36	0,35	0,37	0,43	0,49	0,56	0,61	0,63	0,58	0,52	0,45	0,40	5,76
1.3.0	Bajo Monachil	0,44	0,43	0,44	0,46	0,50	0,56	0,61	0,63	0,60	0,58	0,51	0,47	6,21
1.3.1	Alto Monachil	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.4.0	Bajo Dílar	0,38	0,38	0,39	0,41	0,44	0,47	0,50	0,52	0,52	0,49	0,45	0,41	5,36
1.4.1	Alto Dílar	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.5.0	Arroyo del Salado	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	1,00
1.6.0	Arroyo del Nonis	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,58
2.0.0	Cubillas Bajo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2.1.0	Arroyo del Charrón	0,16	0,15	0,16	0,21	0,25	0,26	0,31	0,31	0,28	0,24	0,20	0,17	2,72
2.2.0	Bajo Veñiles	0,13	0,12	0,14	0,18	0,23	0,27	0,29	0,29	0,27	0,23	0,19	0,15	2,50
2.2.1	Alto Veñiles	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2.3.0	Bajo Colomera	0,07	0,07	0,07	0,10	0,12	0,16	0,16	0,16	0,15	0,12	0,10	0,08	1,34
2.3.1	Río de Las Juntas (Emb. Colomera)	0,28	0,25	0,29	0,30	0,50	0,60	0,64	0,63	0,56	0,46	0,38	0,32	5,30
2.4.0	Bermejo-Embalse Cubillas	0,14	0,14	0,15	0,18	0,21	0,23	0,25	0,25	0,23	0,20	0,17	0,15	2,30
2.4.1	Cubillas-Defontes	3,25	3,22	3,38	3,57	3,97	4,26	4,42	4,39	4,18	3,88	3,60	3,37	45,59
3.0.0	Bajo Cañal	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3.1.0	Alto Cañal (emb. Bermejales)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3.2.0	Cañal (Bermejales)	2,67	2,76	3,09	3,49	3,83	4,12	4,29	4,21	3,91	3,53	3,18	2,87	41,93
Sistema Cornisa-Vega de Granada		12,27	12,13	12,86	14,15	16,57	17,00	17,92	18,02	17,10	15,62	14,21	12,99	179,84

Tabla 9. Distribución del valor medio de la escorrentía subterránea a escala mensual (hm³/mes) y anual (hm³/año) en cada una de las subcuencas en que se ha subdividido el sistema hidrológico Cornisa-Vega de Granada

Table 9. Distribution of the average value of monthly groundwater runoff (hm³/month) and annually (hm³/year) in each one of the sub-basins into which the Cornisa-Vega de Granada water system has been divided

el enfoque adoptado, ni la metodología aplicada, que se adapta a las restricciones que imponen los datos de partida.

El código SIMGES no precisa desglosar la aportación en superficial y subterránea, pues solo requiere como dato de entrada la aportación total, aunque resulta interesante y adecuado conocer el valor y la distribución con la que se presentan cada una de las fracción que componen la escorrentía total, ya que esto facilita la formulación de hipótesis de gestión conjunta, acordes con la potencialidad que ofrece en cada momento y lugar cada tipo de escorrentía, para satisfacer una determinada demanda hídrica.

De acuerdo con lo indicado en el anterior párrafo y en función de los resultados que se aportan en el artículo para la escorrentía superficial y subterránea, se apunta la importancia que puede tener en el presente esquema de uso conjunto la escorrentía subterránea como garante del mantenimiento hídrico de los caudales ambientales aguas arriba de los actuales

embalses de regulación, así como la preponderancia de la escorrentía superficial en los años de tipología climática húmeda y de la escorrentía subterránea en los años de tipología climática seca, que permite plantear el esquema de gestión conjunta que se denomina uso alternativo, que consiste en utilizar preferentemente las aguas superficiales en los años húmedos y las subterráneas en los secos. Este esquema de gestión presenta la ventaja de aprovechar un mayor volumen de agua superficial con una misma capacidad de embalse.

Agradecimientos

El presente artículo deviene de una serie de colaboraciones que el IGME mantiene con la Agencia Andaluza del Agua. Los trabajos sintetizados en el mismo han sido posibles gracias a la colaboración de diferentes organismos públicos y empresas de carác-

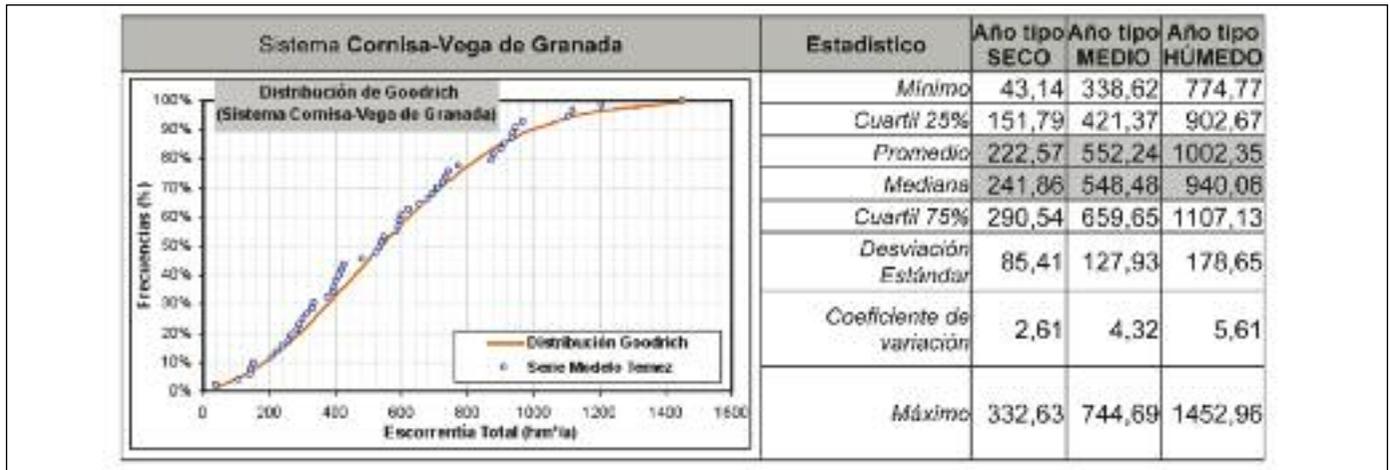


Tabla 10. Ajuste de la función de Goodrich y estadísticos de la serie hidrológica generada mediante el modelo de Témex para el sistema Cornisa-Vega de Granada
 Table 10. Statistics of the hydrological series generated using the Témex model for the Cornisa-Vega de Granada system

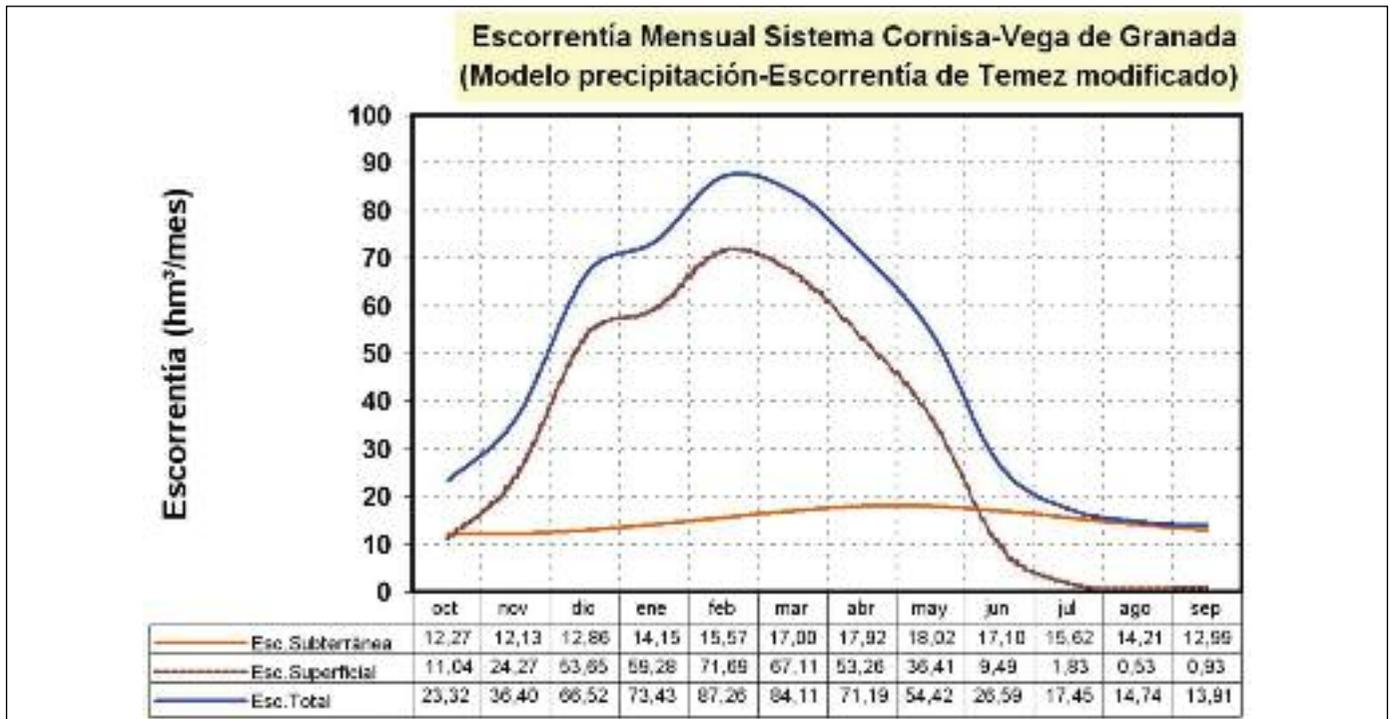


Figura 5. Distribución de la escorrentía en el sistema hidrológico Cornisa-Vega de Granada obtenida mediante la aplicación del Modelo de Témex
 Figure 5. Distribution of the runoff in the Cornisa-Vega de Granada water system obtained by applying the Témex model

ter privado y estatal. En particular se agradece la especial colaboración mostrada por el equipo técnico de la Oficina de Proyectos del IGME en Granada (particularmente Juan Carlos Rubio y Antonio González); la ETSI de Caminos de Valencia (en las personas de

Abel Solera y Andrés Sahuquillo) y la Agencia Andaluza del Agua (en sus técnicos María Estirado e Isabel Clara Rodríguez). También se agradece a José Antonio de la Orden la revisión que ha realizado de los textos escritos en inglés.

Referencias

- Abbott, M.B.; Bathurst, J.C.; Cunge, J.A.; O'Connell P.E. and Rasmussen, J. 1986. An introduction to the European Hydrological System. Systeme Hydrologique European, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*. 87 (1-2) 45-59.
- Abril Gómez, H.; Fernández Rubio, R. y Pulido Bosch, A. 1983. Estudio hidrogeológico de un sector del subbético medio al este del río Colomera (Granada). *III Simposio de Hidrogeología*. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos. VII: 541-551.
- Adarve., A. y Castillo, A. 1999. Estimación de los recursos drenados por el acuífero de la Vega de Granada al río Genil mediante el análisis de los hidrogramas de la estación de Puente Castilla (Granada, España). *Geogaceta*. (25). 7- 10.
- Aguilera, H. and Murillo, J. M. 2008. The effect of possible climate change on natural groundwater recharge based on a simple model: a study of four karstic aquifers in SE Spain *Environmental Geology*. 57. (5). 963-974.
- Álvarez, J.; Sánchez, A. y Quintas, L. 2005. SIMPA, a GRASS Based Tool for Hydrological Studies. *International Journal of Geoinformatics*. 1. (1). 13-20.
- Andreo, B.; Vías, J.; López Geta, J.A.; Carrasco, F.; Durán, J.J. y Jiménez, P. 2004. Aproximación metodológica para evaluar la recarga en acuíferos carbonáticos. *Boletín Geológico y Minero*, 115 (2), 211-222.
- Andreu Álvarez, J.; Solera Solera, A; Capilla Romá, J. y Ferrer Polo, J. 2007. Modelo SIMGES para simulación de cuencas. Manual de usuario v 3.00. Universidad Politécnica de Valencia 136 pp.
- Aragón, R.; Barba-Romero, J.; Rodríguez, L. y Virgos, L. 1995. Determinación del grado actual de regulación de embalses subterráneos mediante la utilización de modelos de precipitación-escorrentía. *VI Simposio de Hidrogeología*, Sevilla, 23, 97-111.
- Cabezas Calvo-Rubio, F.; Estrada Lorenzo, F. y Estrela Monreal, T. 1999. Algunas contribuciones técnicas del Libro Blanco del Agua en España". *Ingeniería Civil*, nº 115, pp. 79-96.
- Castaño, S. y Murillo, J.M. 2003. Coordinated temporal aquifer overexploitation and external water transfers to optimize the use of natural water resources in Marina Baja (Alicante Province, Spain). *Rev. Soc. Geol. España*, 16. (1-2). 51-60.
- Castillo, A. 1986. Estudio hidroquímico del acuífero de la Vega de Granada. Tesis Doctoral Universidad de Granada. 658 pp.
- Castillo Martín, A. 1995. El embalse subterráneo de la Vega de Granada, uno de los más importantes de Andalucía. *Tierra y Tecnología*. (9). 37-42.
- Castillo, A. 2005. El acuífero de la Vega de Granada. Ayer y hoy (1966-2004) *Agua, Minería y Medio Ambiente. Libro Homenaje al Profesor Rafael Fernández Rubio*. Instituto Geológico y Minero de España. 161-172.
- CHG. 2005. Identificación y Caracterización inicial de las masas de agua subterránea. Artículo 5 DMA. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Volumen GWB. 1-2.
- Conrad, J, Nel, J., and Wentzel J., 2004. The challenges and implications of assessing groundwater recharge: A case study - northern Sandveld, Western Cape, South Africa. *Water SA*, 30 (5), 75-81.
- Delgado Moya, S. y López García, L. (1983). Modelos matemáticos y modelistas: Ciencia y ficción. *III Simposio de Hidrogeología*. Madrid (9). 3-11.
- DGOH-ITGE. 1988. Delimitación de las Unidades Hidrogeológicas de la España peninsular e islas Baleares y síntesis de sus características. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Informaciones y Estudios (52) 32 pp.
- DPG-ITGE. 1990. *Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Granada*. Diputación Provincial de Granada-Instituto Tecnológico Geominero de España. 107 pp.
- Estrela, T. 1992-a. *Metodologías y recomendaciones para la evaluación de recursos hídricos*. Centro de Estudios Hidrográficos y Experimentación de Obras Públicas. CEDEX. 51 pp.
- Estrela, T. 1992-b. *Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos*. Centro de Estudios Hidrográficos y Experimentación de Obras Públicas. CEDEX. 55 pp.
- Estrela Monreal, T. y Quintas Ripoll, L. 1996. El sistema integrado de modelización precipitación-aportación SIMPA". *Ingeniería Civil*, nº 104.
- Estrela, T. 1997. Formulación teórica del modelo de Témez. Calibración de parámetros. En: *Máster en Hidrología General y Aplicada del CEDEX. Área de Hidrología Superficial II. Tomo II*. 18 pp.
- Fernández Chacón, F., Rubio Campos, J. C., López-Martos, J., González Ramón, A., López-Geta, J. A. y Murillo-Díaz, J. M. 2004. Primeros datos sobre la investigación de sectores favorables a una explotación sostenible en los acuíferos de Padul-La Peza-Albuñuelas como apoyo al abastecimiento de los núcleos del entorno de la Vega de Granada (Andalucía)" Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación de Aguas (Tortosa). Versión electrónica en CD-Rom
- Fernández del Río, G. y Sahuquillo Herráiz, A. 1983. Estudio del comportamiento de un acuífero drenado por un manantial. Aplicación al caso del manantial de Deifontes (Granada)". *III Simposio de Hidrogeología*. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos. Madrid. 519-529.
- García-Aróstegui, J., Heredia, J., Murillo, J., Rubio-Campos, J., González-Ramón, A. y López-Geta, J. 2001. Primera aproximación mediante modelización al análisis de la influencia del embalse de Rules en el régimen hidrológico del acuífero de Motril-Salobreña (Granada). V Simposio sobre el agua en Andalucía, Almería. Volumen II, sección: Hidrogeología, 15 pp.
- García Vera, M.A. y Arqued, V. 2000. Evaluación de los recursos hídricos subterráneos en el dominio hidrogeológico Alto Jalón – Alto Jiloca. *Geotemas* 1 (2), Madrid. 87-91.
- Gómez Gómez, J. de D., López Geta, J. A. y Navarro Iáñez, J. A. 2001. Modelo de uso conjunto de recursos hídricos en la Costa del Sol Occidental. *Las Caras del Agua Subterránea: Congreso en Memoria de Germán Alfonso Galarza López*. Vol.2. 745-752.
- Heredia, J. y Murillo, J. 2002. Balance hídrico y estimación

- de la recarga mediante modelación numérica en pequeñas cuencas del sector suroriental de la isla de Gran Canaria. XI Congreso Internacional de Industria, Minería y Metalurgia. Zaragoza. 19 pp.
- IGME. 2006. Mapa litoestratigráfico y de permeabilidades de España a escala 1:200000. Instituto Geológico y Minero de España.
- IGME-JA. 1998. Atlas hidrogeológico de Andalucía. Instituto Geológico y Minero de España- Junta de Andalucía. 216 pp.
- IGME-JA. 2008. Estudio metodológico para la integración de recursos hídricos subterráneos, superficiales y alternativos en la Comarcas de la Vega de Granada y cornisa de Granada. Instituto Geológico y Minero de España- Junta de Andalucía. 573 pp.
- López Rodríguez, J.J. y Giráldez Cervera, J.V. 1997. Evaluación de la modificación de la recarga por cambios en la cobertura vegetal. En: Custodio, E., Llamas, M.R. y Samper, J. (ed.), *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la Planificación Hidrológica*. Asociación Internacional de Hidrogeólogos. Grupo Español, Las Palmas de Gran Canaria, 209-227.
- Lucena Bony, C. (1986). Modelos Matemáticos de Simulación Directa. *XIX Curso de Hidrogeología Aplicada. Area VIII*. Ministerio de Industria y Energía. Ministerio de Educación y Ciencia. 1-41.
- Luque Espinar, J.A., Castillo Martín, A., Juárez García, J., Riera Rico, J., Rubio Campos, J.C., Perandrés Estarlı. G., Delgado García, J., Mittelbrum Damas, L., Navarro López Obrero, R., Chica Olmo, M. y Delgado, M. 2002. Los acuíferos de la depresión de Granada y su cornisa. *Libro Homenaje a Manuel del Valle Cardenete*. 347-356.
- Llamas, M.R. y Galofré, A. (1976). Conceptos básicos y definiciones. En: Custodio, E. y Llamas, M.R. (ed.). *Hidrología Subterránea*. Editorial Omega. Barcelona. 271-282.
- Mangin, A. 1982. *L'approche systématique du karst, conséquences conceptuelles et méthodologiques*. Reunión Monográfica Karst Larra. Diputación Foral de Navarra. Pamplona. 141-157.
- Martín Machuca, M. y Virgos, L. 1995. Modelo matemático del acuífero de Almonte-Marismas. *VI Simposio de Hidrogeología*, Sevilla, 19, 639-660.
- Martínez, L; Sole, J. y Carrera, J. (1995). Corrección de la evapotranspiración calculada por Thornthwaite. *VI Simposio de Hidrogeología*. (19). Sevilla. 31-45.
- Murillo, J.M. 2004. *Recarga de acuíferos. Evaluación y análisis de condicionantes técnicos y económicos. Acuífero aluvial del Bajo Guadalquivir*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 749 pp.
- Murillo, J. M., Arce-Montejo, M y García Lapresta, M. 2007. Estimación de la recarga natural en el acuífero costero de Torrevieja (Alicante) mediante la aplicación del código VISUAL BALAN. En: Pulido, A; López Geta, J.A. y Ramos, G. (ed). *Los acuíferos costeros retos y soluciones*. Instituto Geológico y Minero de España. 913-925.
- Murillo, J.M., Castaño, S. y Henche, M. 2002. Optimización del uso de los recursos hídricos del sector Sierra de Baza (Granada, Cuenca del Guadalquivir, España) mediante el empleo de un modelo matemático de simulación conjunta. *Boletín Geológico y Minero*. 113. (2). 185-198.
- Murillo, J.M. y De la Orden, J.A. 1996. Sobreexplotación, alternativas de gestión y evaluación del efecto del cambio climático en la recarga natural del acuífero kimmeridgiense de Cabezón de Oro (Alicante). En: *Recursos Hídricos en Regiones Kársticas*, Vitoria, 73-88.
- Murillo, J.M. y Navarro, J. A. 2008. Las aguas subterráneas en la investigación y la gestión hídrica medioambiental. Uso Conjunto y caudal medioambiental. Aplicación al sistema de aprovechamiento del Quiebrajano-Víboras. Instituto Geológico y Minero de España y Agencia Andaluza del Agua. 233 pp.
- Murillo, J. M. y Navarro, J. A. 2010. *Conceptos Generales*. En Murillo, J. M., López Geta., J. A. y Rodríguez, L (Eds) "Desarrollo Sostenible, Uso Conjunto y Gestión Integral de Recursos Hídricos". Diputación de Alicante e Instituto Geológico y Minero de España. Capítulo 1. 16-171.
- Ortiz, G., de la Orden, J.A., y Murillo, J.M. 2008. Balance hidrometeorológico del acuífero de Crestatx (Mallorca). IX Simposio de Hidrogeología. Elche (Alicante). 13-24.
- Ortiz López, J.L., Iglesias Delgado de, T.E., Hernández Machado, R., Mera Merino de, A., Gómez Sánchez, M., López Bravo, J. y Ballester Rodríguez, A. 2001. *Desarrollo de programas para el tratamiento de series hidrológicas y evaluación de aportaciones hídricas subterráneas (HIDROBAS v.3.0)*. VII Simposio de Hidrogeología. Murcia. (23). 333-341.
- Padilla Benítez, A. y Pulido Bosch, A. (1986). El programa "Evadia" para estimación automática de la lluvia útil a nivel diario. *II Simposio sobre el agua en Andalucía*. Departamento de Hidrogeología. Universidad de Granada. (2). 631-636.
- Pizarro, R., Soto, M.; Farias, C. y Jordán, C. 2005. Aplicación de dos Modelos de Simulación Integral Hidrológica, para la estimación de caudales medios mensuales, en dos cuencas de Chile central. *Bosque*. 26. (2). 123-129.
- Potenciano de las Heras, A. y Villaverde Valero, J. J. 2010. Implementación del modelo hidrológico de Témez para la evaluación de recursos hídricos con GRASS GIS. Fase superficial y subterránea. III Jornadas de SIG libre. Servei de Sistemes D'Informació Geogràfica i Teledetecció. Universitat Girona. <http://www.sigte.udg.es>.
- Pulido, D., Sahuquillo, A., Andreu J. y Pulido M. 2006. *Simulación del flujo subterráneo en sistemas de uso conjunto*. Universidad Politécnica de Valencia. 73 pp.
- Romero, P., Elorza, F., Murillo, J., Hornero, J. y Hernández, L. 2004. Estimación de la recarga en el acuífero del cabo Roig (Alicante). VIII Simposio de Hidrogeología. Zaragoza. Ed. A.E.H., tomo XXVI, sección: Simulación Matemática.
- Ruiz García, J. M. 1999. *Modelo distribuido para la evaluación de recursos hídricos*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (Cedex). 245 pp.
- Sahuquillo Herraiz, A. (1972). Sistemas y Modelos. Número dedicado al seminario sobre modelos analógicos y digitales para la explotación y administración de recursos hidráulicos subterráneos. *Informaciones y Estudios*. Servicio Geológico. Ministerio de Obras Públicas. (37). 11-20.

- Sahuquillo, A. 1983. An eigen value numerical technique for solving unsteady groundwater models continuously in time. *Water Resources Research*. 19 (1) 87-93.
- Sahuquillo, A. 1985. Criterios actuales para la gestión conjunta de aguas superficiales y subterráneas. *Revista de Obras Públicas*. CXXXII, 3235, 231-253.
- Sahuquillo Herraiz, A. 1993. Simulación de acuíferos en los modelos de gestión. Conceptos y Métodos para la planificación hidrológica (Ed. Andreu, J.). Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería CIMNE. Barcelona. pp. 137-170.
- Samper Calvete, J. y García Vera, M.A. (1997). Estimación de la recarga producida por la lluvia y los excedentes de riego mediante balances diarios de agua en el suelo: experiencias en diferentes zonas climáticas. En: Custodio, E; Llamas, M.R. y Samper, J. (ed). *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la Planificación Hidrológica*. Asociación Internacional de Hidrogeólogos. Grupo Español. Las Palmas de Gran Canaria. 367-379.
- Samper, J. y García Vera, M.A. 2004. Visual-Balan, un modelo interactivo de balance hidrológico: estado actual y desarrollos futuros. VIII Simposio de Hidrogeología, Zaragoza, 18-22 de octubre de 2004. 595-604.
- Samper, J., Huguet, Ll., Ares, J. y García Vera, M.A. 1999. Manual del usuario del programa VISUAL BALAN v.1.0: Código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga. Publicación Técnica de ENRESA nº 5/99, Madrid. 205 pp.
- Samper, F.J., García Vera, M.A., Pisani, B., Alvares, D., Varela, A. y Losada, J.A. 2005. Modelos hidrológicos y sistemas de información geográfica para la estimación de los recursos hídricos: aplicación de Gis-Balan a varias cuencas españolas. En F.J. Samper Calvete y A. Paz González (Editores). *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol VII*. 296-274.
- Sánchez González, A y Murillo, J.M. 1997. Integración de los acuíferos en los sistemas de explotación. Programa estatal de estudios para la definición de la utilización coordinada de recursos superficiales y subterráneos. Ministerio de Medio Ambiente. Secretaría de Estado de Aguas y Costas. Madrid. 41 pp.
- Sole, J; Carrera, J. y Galarza, G. (1995). Modelos de evapotranspiración potencial: Revisión y propuesta de clasificación. *VI Simposio de Hidrogeología*. (19). Sevilla. 19-29.
- Solera, A., Paredes, P. y Andreu, J. 2010. Datos hidrológicos. En: Sahuquillo, A., Casiraga, E., Solera, A. y Murillo, J.M. (ed). *Modelos de uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas*. Instituto Geológico y Minero de España. 367 pp.
- Tapia, F.O. y Mora, F.E. 2004. The Information Society: New Horizons for Science. *19th International CODATA Conference*, Berlín, 13 pp.
- Témez, J. R. 1977. *Modelo Matemático de transformación "precipitación-escorrentía"*. Asociación de Investigación Industrial Eléctrica. ASINEL. Madrid. 39 pp.
- USA-CERL. 1982. *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS GIS)*. Army Construction Engineering Research Laboratories. United States America (USA-CERL). <http://grass.itc.it>
- Valls, M. 2001. Caracterización de la recarga y estimación del almacenamiento en el acuífero kárstico de Troya (Guipúzcoa) mediante la utilización del modelo VISUAL BALAN y la realización de balances hídricos generales. *Tesina de máster*. UPC, Barcelona.

Recibido: septiembre 2010

Revisado: diciembre 2010

Aceptado: mayo 2011

Publicado: julio 2011

