

Ciclo de Planificación Hidrológica 2015/2021

PLAN HIDROLÓGICO

Demarcación Hidrográfica del Tinto,
Odiel Y Piedras



APÉNDICE 2.1

DESCRIPCIÓN DEL MODELO UTILIZADO



Como se ha mencionado en el apartado 4.2.1 de este documento, el modelo de simulación utilizado para la evaluación de los recursos hídricos naturales (RRHHNN) en la DHTOP, ha sido el modelo de precipitación-aportación SIMPA. En este apartado se pretende dar una descripción de mayor detalle sobre este modelo para una mejor comprensión del lector.

El modelo de simulación de aportaciones mensuales de SIMPA (Cabezas et al., 2000; Ruiz, 2000; Estrela y Quintas, 1996) reproduce los procesos esenciales de transporte de agua que tienen lugar en las diferentes fases del ciclo hidrológico. Es un modelo hidrológico conceptual y cuasidistribuido que permite obtener caudales medios mensuales en régimen natural en puntos de la red hidrográfica de una cuenca.

En cada una de las celdas en que se discretiza el territorio plantea el principio de continuidad y leyes de reparto y transferencia entre los distintos almacenamientos. La resolución temporal que utiliza es el mes, por lo que puede obviarse la simulación de un gran número de almacenamientos intermedios y la propagación del flujo en la cuenca.

La información de partida del modelo está constituida por los datos de precipitaciones y temperaturas mensuales en las estaciones meteorológicas y los datos de caudales históricos en los puntos de contraste. Toda esta información se gestiona en la base de datos HIDRO (Quintas, 1996) del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX.

A continuación se muestra el resumen sobre el modelo presentado como artículo invitado y publicado en Ingeniería del Agua. Vol. 6 Núm. 2 (junio 1999), páginas 125-138 realizado por Teodoro Estrela Monreal, Francisco Cabezas Calvo-Rubio y Federico Estrada Lorenzo.

INTRODUCCIÓN

En diciembre de 1998 el Ministerio de Medio Ambiente presentó al Consejo Nacional del Agua el Libro Blanco del Agua en España, abriendo un periodo de comentarios, discusiones y debates públicos que se ha prolongado durante meses.

Uno de los objetivos perseguidos al elaborar el Libro fue disponer de un soporte material ordenado, extenso y riguroso para la discusión y el debate social, mediante el cual los procesos de maduración interna y contraste de opiniones adquirieran la mayor transparencia posible, al fundamentarse en bases documentales objetivas y explícitas

Por este motivo, el Libro consta de una parte de naturaleza básicamente técnica y expositiva, que refleja el estado del arte en lo referente a la situación actual de conocimientos en materia hídrica, incluyendo una descripción de los problemas básicos existentes y previsibles, e incorporando contribuciones documentales y perspectivas de diferentes órganos administrativos sectoriales. Tal estado del arte no se limita a una mera recopilación y exposición documental, sino que incorpora desarrollos tecnológicos propios, específicamente realizados para el Libro. Esta parte de descripción de datos, situaciones y problemas del agua en España se ha considerado, en todo momento, esencial y, de hecho, ocupa una importante extensión del documento. Atendiendo a su posible interés técnico y científico se han seleccionado algunos de estos desarrollos tecnológicos con la intención de presentarlos en sucesivos números de esta Revista. En concreto, para este primer artículo se ha elegido el modelo hidrológico distribuido utilizado para la evaluación de los recursos hídricos en régimen natural. En posteriores artículos se pretende

presentar otros desarrollos, como el procedimiento de regionalización hidrometeorológica, el modelo cartográfico desarrollado para la identificación de desequilibrios territoriales, el modelo analítico para el estudio del sistema de utilización del agua o el procedimiento para acotar las incertidumbres asociadas al posible cambio climático. El objetivo es describir estos instrumentos y procedimientos con un nivel de detalle apropiado para una revista especializada, pero que no se consideró procedente alcanzar en el Libro Blanco por su orientación eminentemente divulgativa.

Quizá otro de los avances técnicos más importantes del Libro haya sido la recopilación de los datos básicos del agua en España, cuya necesidad y utilidad se manifestaron desde el inicio de los trabajos como algo evidente. Estos datos básicos se encontraban en una situación de enorme dispersión en numerosas instancias administrativas y privadas, y su mera síntesis y unificación, ciertamente complicada, ya posee un gran interés intrínseco. La ingente labor de recopilación y unificación desarrollada ha permitido darles un tratamiento sistemático y uniforme, organizándolos y actualizándolos, creando archivos comunes consistentes, y permitiendo su integración en bancos de datos homogéneos. A pesar de la indudable trascendencia de esta labor, en este artículo no se hacen referencias explícitas a la estructura y contenidos de estos bancos de datos, si bien, y como es fácil comprender, sin esta organización de la información no habría sido posible aplicar de modo práctico la mayor parte de los procedimientos desarrollados.

Tampoco se analizan ni se ofrecen con detalle los resultados obtenidos, centrándose en la descripción técnica de los métodos y procedimientos desarrollados. Para una consulta pormenorizada de los resultados se recomienda acudir al propio Libro Blanco.

Con objeto de actualizar las series hidrológicas hasta el año hidrológico 1995/96 mediante una metodología homogénea para todas las cuencas españolas, en el Libro Blanco se ha utilizado un modelo matemático de simulación de las aportaciones naturales. El procedimiento de evaluación ha consistido en la modelación distribuida de los componentes básicos del ciclo hidrológico con periodo temporal mensual y a la escala global de todo el territorio nacional.

En las últimas décadas se han desarrollado numerosos modelos con el objetivo de generar series de aportaciones naturales. Estos modelos simulan el proceso de generación de la escorrentía a partir de información meteorológica y de las características de las cuencas, y han jugado un importante papel en los procesos de planificación hidrológica y de gestión de recursos (Chairat y Delleur, 1993).

Si bien en el pasado ha sido habitual la utilización de modelos agregados, como el clásico STANFORD IV (Crawford y Linsley, 1966) o el modelo SACRAMENTO (Burnash *et al.*, 1973), hoy en día es común desarrollar modelos distribuidos, que consideran explícitamente la variabilidad espacial de los datos y parámetros hidrológicos. Si estos modelos se plantean bajo bases teóricas, como por ejemplo hace el modelo SHE (DHI, 1985; Abbot *et al.*, 1986) al formular e integrar de forma conjunta las ecuaciones diferenciales que rigen los distintos procesos físicos del ciclo hidrológico, no suelen ser operacionales para el tratamiento de grandes cuencas y es por ello que sólo se han aplicado -y no sin dificultades- a cuencas de cientos de kilómetros cuadrados. Una interesante experiencia al respecto es la desarrollada en la cuenca del Segura, en el marco del proyecto Medalus. Según Deursen y Kwadijk (1993) otra solución de compromiso para evaluar los recursos en grandes cuencas consistiría en plantear modelos distribuidos conceptuales.

En todo caso, es crucial comprender el problema de las escalas espacio-temporales y el de la sobreparametrización de los modelos. Una adecuada consideración de ambas cuestiones resulta esencial para una correcta modelación hidrológica.

LA APROXIMACIÓN DEL LIBRO BLANCO

Dadas las condiciones, necesidades y objetivos del Libro Blanco, se ha utilizado el modelo hidrológico denominado SIMPA (Simulación Precipitación-Aportación), de tipo conceptual y distribuido, y que simula caudales medios mensuales en régimen natural en cualquier punto de la red hidrográfica de una cuenca (Estrela y Quintas, 1996a y 1996b, Ruiz, 1998). Reproduce los procesos esenciales de transporte de agua que tienen lugar en las diferentes fases del ciclo hidrológico (Figura 1) planteando el principio de continuidad y estableciendo leyes de reparto y transferencia entre almacenamientos, en cada una de las celdas en que se discretiza el territorio. La resolución temporal que utiliza es el mes, por lo que puede obviarse la simulación de un gran número de almacenamientos intermedios y la propagación del flujo en la cuenca.

En cuanto a la resolución espacial, el tamaño de celda seleccionado es de 1 km², lo que supone que en cada paso de tiempo se simulan los distintos componentes del ciclo hidrológico en más de 500.000 celdas.

A partir de las precipitaciones, las evapotranspiraciones potenciales y los parámetros hidrológicos, el modelo obtiene los mapas de los distintos almacenamientos, humedad en el suelo y volumen de acuífero, y de las variables de salida del ciclo hidrológico, evapotranspiración y escorrentía total, obtenida esta última como suma de la escorrentía superficial y la subterránea. Los caudales mensuales, en cada intervalo de tiempo, se obtienen integrando la escorrentía total en las cuencas vertientes a los puntos de simulación.

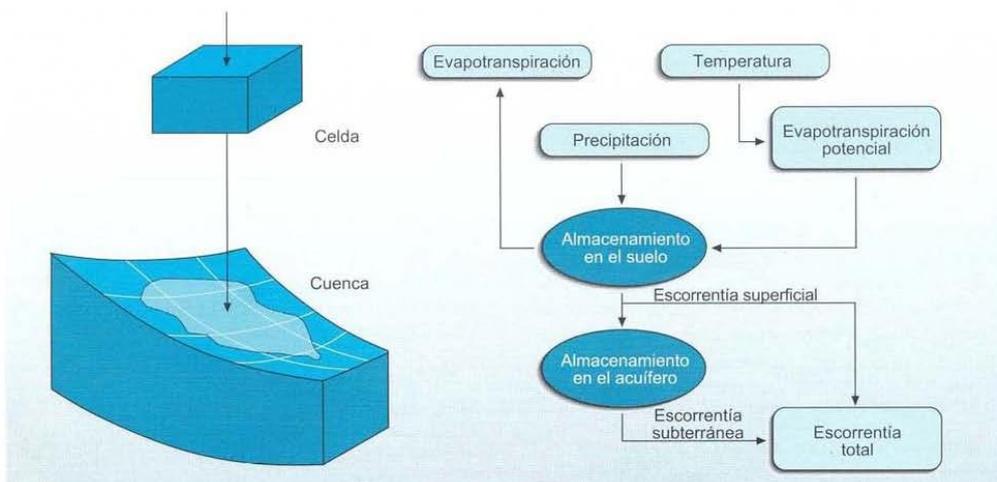


Figura 1. Diagrama de flujo del modelo distribuido SIMPA

BASES TEÓRICAS

El modelo plantea una serie de ecuaciones conceptuales para el cálculo de los flujos y almacenamientos de agua en las celdas en las que se ha discretizado el territorio. El cálculo del excedente de agua en cada celda es, básicamente, función de la precipitación (P_i), del déficit de humedad en el suelo ($H_{m\acute{a}x} - H_{i-1}$) y de la evapotranspiración potencial (EP_i), y tiene como expresión (Témez, 1977):

$$P_i \leq P_o \Rightarrow T_i = 0$$

$$P_i > P_o \Rightarrow T_i = \frac{(P_i - P_o)^2}{P_i + \delta - 2 \cdot P_o}$$

donde:

$$\delta = H_{m\acute{a}x} - H_{i-1} + EP_i$$

$$P_o = C \cdot (H_{m\acute{a}x} - H_{i-1})$$

siendo en cada celda:

- P_i precipitación en el mes i (mm)
- T_i excedente de agua en el mes i (mm)
- $H_{m\acute{a}x}$ capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo (mm)
- H_{i-1} almacenamiento de agua en el suelo en el mes $i-1$ (mm)
- EP_i evapotranspiración potencial en el mes i (mm)
- C parámetro de excedente, que toma valores del orden de 0,3

El almacenamiento de agua en el suelo (H_i) y la evapotranspiración real (E_i) en cada celda en el mes i se obtienen mediante las siguientes expresiones:

$$H_i = \text{m\acute{a}x}(0, H_{i-1} + P_i - T_i - EP_i)$$

$$E_i = \text{m\acute{i}n}(H_{i-1} + P_i - T_i, EP_i)$$

La infiltración al acuífero por lluvia directa (I_i) en cada celda es función del excedente de agua (T_i) y del parámetro de infiltración máxima ($I_{m\acute{a}x}$) y adopta la siguiente expresión (Témez, 1977):

$$I_i = I_{m\acute{a}x} \cdot \frac{T_i}{T_i + I_{m\acute{a}x}}$$

El modelo asume que la recarga al acuífero en cada celda coincide con la infiltración. Una vez calculada la recarga en cada una de las celdas pertenecientes a los distintos acuíferos, el modelo realiza su integración en los recintos que los definen y aplica el conocido modelo unicelular de forma agregada. La evolución del volumen almacenado en el acuífero y su descarga a la red de drenaje superficial o al mar se realiza mediante las siguientes expresiones:

$$V_i = V_{i-1} - V_{i-1} \cdot e^{-\alpha \Delta t} R_i \left(\frac{1 - e^{-\alpha \Delta t}}{\alpha} \right)$$

$$A_{sub_i} = V_{i-1} - V_i + R_i$$

siendo:

- α coeficiente de agotamiento del acuífero (meses⁻¹)
- Δt intervalo temporal (mes)
- P_i recarga al acuífero en el mes i (mm/mes)
- V_i volumen almacenado en el acuífero en el mes i (mm)
- A_{SUB_i} aportación subterránea correspondiente al mes i (mm/mes)

La aportación total es igual a la parte de excedente (T_i) no infiltrada (I_i) más la aportación subterránea (A_{SUB_i}):

$$A_{TOT_i} = T_i - I_i = A_{SUB_i} = A_{SUB_i} + A_{SUB_i}$$

siendo:

- A_{SUB_i} aportación superficial del mes i (mm/mes)
- A_{SUB_i} aportación total durante el mes i (mm/mes).

Aparte, lógicamente, de las limitaciones que tiene todo modelo por ser una simplificación más o menos aproximada de la realidad, este modelo presenta dos limitaciones teóricas que conviene mencionar, aunque no sean, en la práctica, nada significativas en una evaluación de recursos a escala nacional. La primera se debe a la no consideración de la propagación del flujo sobre la cuenca, lo que dificulta el que puedan tenerse en cuenta las pérdidas por infiltración en los cauces perdedores, y la consiguiente recarga que en esas situaciones se induce hacia los acuíferos. Esta limitación obliga a que en acuíferos donde se produzca recarga por infiltración desde cauces perdedores haya que tener en cuenta las estimaciones realizadas externamente al modelo. Sin embargo, cabe también mencionar que no tendría mucho sentido, dada la finalidad de los trabajos, ni sería realista, por los tiempos de ejecución que conllevaría, el considerar la propagación dinámica de flujos superficiales a escala de todo el territorio nacional. La segunda limitación es que el modelo no está pensado para simular las variaciones espaciales en la piezometría de los acuíferos, sino únicamente el intercambio de agua entre éstos y la red fluvial o el mar. Al igual que otros modelos conceptuales existentes, este modelo se ha diseñado para la evaluación de recursos hídricos, incluyendo la recarga por lluvia directa en el acuífero, y no para la simulación del movimiento interno del agua en el acuífero, que debe, lógicamente, ser abordada mediante otras aproximaciones metodológicas.

CÁLCULO DE PRECIPITACIONES Y EVAPO-TRANSPIRACIONES POTENCIALES

La precipitación y la evapotranspiración son las dos variables climáticas básicas que, con el control establecido por el terreno, configuran el régimen de las escorrentías de un territorio. La importancia que la estimación de estas dos variables tiene en la evaluación de recursos justifica, por tanto, el detalle con el que se aborda en este apartado la descripción de los cálculos realizados.

El modelo estima la precipitación mes a mes durante todo el periodo de simulación en cada una de las celdas en las que se ha discretizado el territorio. Los distintos

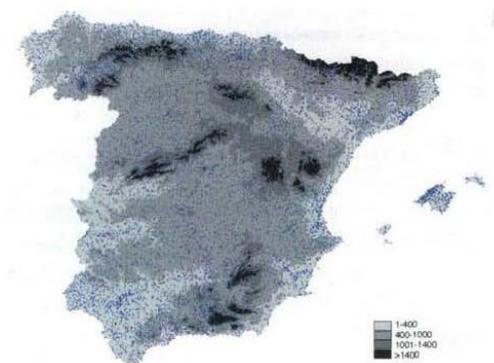


Figura 2. Red de estaciones pluviométricas sobre el modelo digital del terreno (cotas en metros)

mapas de precipitaciones se obtienen a partir de la interpolación de los datos registrados en los pluviómetros mediante el método del inverso de la distancia al cuadrado.

El procedimiento de interpolación seguido utiliza los datos de las más de 5.000 estaciones meteorológicas operativas existentes en España (Figura 2). Sin embargo, a pesar del elevado número de estaciones, la estimación de la distribución espacial de la precipitación se encuentra, en ocasiones, con el inconveniente de que muchos de los pluviómetros sólo disponen de series cortas o incompletas, que dejan en algunos periodos amplias zonas sin información, sobre todo en los primeros años de la serie. En esos casos se ha utilizado un modelo de regresión doble para rellenar las lagunas de una estación a partir de los datos de las estaciones próximas. Este modelo estacionariza previamente los datos mensuales originales de cada estación, restándoles la media del mes y dividiendo la diferencia por la desviación típica, también media del mes. Para preservar la varianza

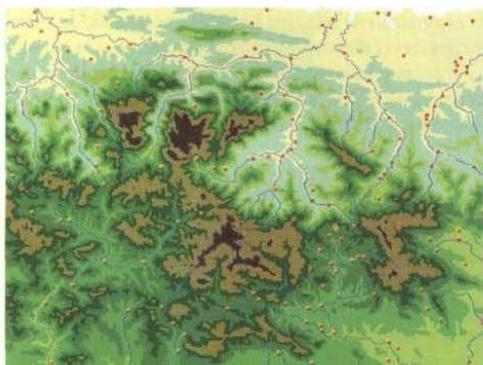


Figura 3. Mapa de distribución espacial de estaciones pluviométricas en los Picos de Europa, sobre un modelo digital del terreno

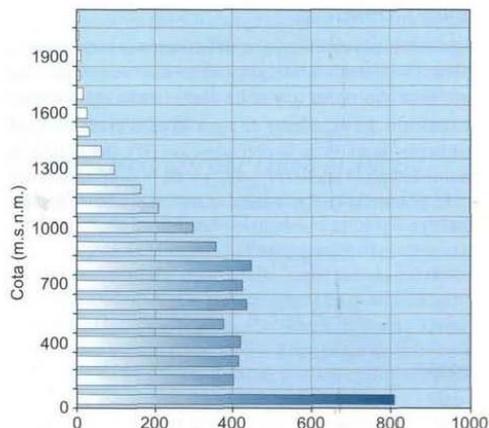


Figura 4. Distribución de las estaciones meteorológicas según su altitud

de la serie completada se ha introducido un ruido blanco en la ecuación de regresión. Una vez aplicada la ecuación de correlación se procede a desestacionarizar los datos completados.

Por otra parte, las estaciones meteorológicas no siempre se distribuyen de la forma deseada sobre la cuenca, ya que es habitual que se localicen en los valles y no en las zonas de mayor altitud. Esta distribución puede apreciarse en la Figura 2 y, con mayor detalle, en la Figura 3, donde se muestra la distribución espacial de estaciones pluviométricas en los Picos de Europa sobre un modelo digital del terreno

Este mismo efecto puede observarse en la Figura 4, que muestra la distribución de las estaciones meteorológicas en España según su altitud.

La Figura 5 muestra, asimismo, la curva porcentual acumulada de superficie del territorio frente al número de

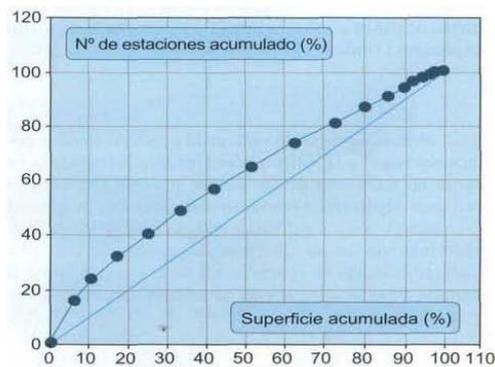


Figura 5. Curva porcentual acumulada de superficie del territorio frente a número de estaciones meteorológicas a las distintas cotas

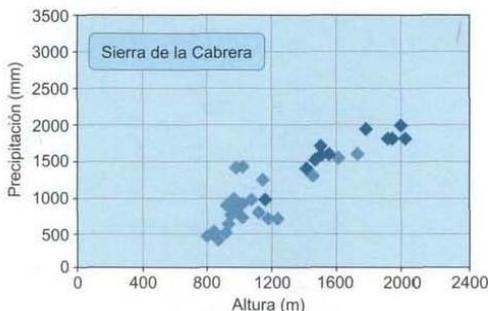


Figura 6. Establecimiento de regresiones precipitación-altura

estaciones, con un punto de la curva para cada una de las cotas dadas en la figura anterior. Puede apreciarse con claridad el sesgo de las estaciones hacia las cotas más bajas, frente a lo que sería una distribución perfectamente uniforme a lo largo de todo el relieve del país (línea azul de 45°).

La falta de estaciones en las zonas más altas produce infravaloraciones importantes de la lluvia en muchas cuencas de cabecera al aplicar directamente los algoritmos de interpolación espacial. Esta infravaloración en las lluvias de las cuencas de cabecera da lugar a una infravaloración muy importante de los recursos estimados a partir de las lluvias y pone de relieve la necesidad de disponer de redes de medida meteorológicas que tengan cobertura en las zonas de montaña. Para suplir esta carencia se han generado series de precipitaciones en estaciones ficticias teniendo en cuenta la correlación de la lluvia con la altitud.

Para la obtención de estas series se han realizado estudios específicos regionales que mejoran la interpolación en las zonas donde no se dispone de suficientes pluviómetros. Así se han realizado análisis de regresión (Figura 6) entre la precipitación y la altitud que tienen en cuenta la orientación o exposición de las laderas a las tormentas y los balances regionales precipitación-aportación en las cuencas vertientes a las estaciones de aforo. Como consecuencia de estos análisis se han generado



Figura 7. Estaciones pluviométricas ficticias introducidas



Figura 8. Precipitación media anual (mm) en el periodo comprendido entre los años hidrológicos 1940/41 y 1995/96

una serie de pluviómetros ficticios en cuyos datos se preservan las relaciones lluvia-altitud obtenidas en cada región. Este procedimiento se ha realizado básicamente (Figura 7) en las vertientes de la Cordillera Cantábrica y Montes de León, Pirineos, Picos de Urbión y Sierra de Albarracín, Sistema Central y Macizo de Gredos, Sierra de Alguazas, Sierra de Cazorla y Sierra Nevada.

Aunque este trabajo ha sido realizado de forma iterativa, definiendo regiones, analizando las correlaciones en ellas, volviendo a modificar las regiones, y así hasta encontrar unas regiones en las cuales se identificaran claramente las correlaciones entre las lluvias y la altitud, en la actualidad, y como continuación de estos trabajos, se están realizando análisis que persiguen la automatización de este proceso mediante el uso de técnicas geoestadísticas. Con estas técnicas se están analizando los factores que condicionan el proceso (precipitación, altitud, orientación, pendientes, etc.), los procedimientos para el establecimiento de regiones en función de los factores seleccionados y, finalmente, se están definiendo las ecuaciones a aplicar.

Mediante el procedimiento descrito se han estimado los mapas de precipitaciones mensuales para el periodo de simulación. En la Figura 8 se muestra el correspondiente a la media anual del periodo

En cuanto a la evapotranspiración potencial se ha utilizado una combinación de los métodos de Thornthwaite y Penman-Monteith, y se ha introducido un coeficiente reductor que tiene en cuenta el efecto de la vegetación. El método de Thornthwaite ha venido utilizándose tradicionalmente en España debido a que básicamente sólo necesita datos de temperatura, información que habitualmente se encuentra disponible cubriendo amplias regiones del territorio (Figura 9). Sin embargo este método, válido en zonas húmedas y subhúmedas con precipitaciones estivales, suele infravalorar las evapotranspiraciones potenciales en zonas con climas distintos a los anteriores. En concreto, es conocido que en zonas áridas y semiáridas infravalora la evapotranspiración po-



Figura 9. Distribución espacial de las estaciones termométricas en España

tencial. Otros métodos de estimación de la evapotranspiración potencial, como el de Penman-Monteith, que ha sido recomendado por la FAO, definen físicamente mejor el fenómeno y logran ajustar sus resultados a las diferentes condiciones climáticas, aunque por el contrario necesitan de un mayor número de variables. La información que precisan para su aplicación sólo suele estar disponible en las estaciones meteorológicas completas, que registran datos de temperatura, radiación solar, humedad atmosférica, velocidad del viento, etc., y cuyo número es muy reducido en España (Figura 10).

El procedimiento seguido para estimar la evapotranspiración potencial ha consistido en aplicar el método de Thornthwaite en cada celda y para cada uno de los meses del periodo y modificar posteriormente los mapas calculados mediante unos mapas mensuales de coeficientes correctores. Estos 12 mapas correctores se han obtenido interpolando los coeficientes que resultan de dividir la evapotranspiración potencial media mensual calculada según Penman-Monteith y la calculada según Thornthwaite en las estaciones meteorológicas completas, donde como ya se ha mencionado existe suficiente



Figura 10. Distribución espacial de las estaciones completas en España

información para aplicar ambos métodos. En las Figuras 11 y 12 se muestra un ejemplo de la estimación de la evapotranspiración potencial en el mes de julio de 1990 según el método de Thornthwaite y según el procedimiento aquí descrito.

La temperatura es una variable determinante para el cálculo de la evapotranspiración potencial, y al igual que sucede con la precipitación muestra una correlación significativa con la altitud. Dado que las estaciones meteorológicas que registran la temperatura también escasean en las zonas más montañosas, se han introducido estaciones ficticias cuyas series de temperaturas mensuales se han obtenido en función de los valores registrados en las estaciones vecinas y de las correlaciones existentes con la altitud. En estos estudios se ha encontrado que, en valores medios, el gradiente entre la temperatura y la altitud sigue un comportamiento similar al del gradiente adiabático, 0,6°C/100 m (Figura 13).

Seguidamente se procedió a interpolar los mapas de temperaturas mensuales, que se utilizaron posteriormente para el cálculo de la evapotranspiración mensual según Thornthwaite. Aplicando los mapas de coeficientes co-

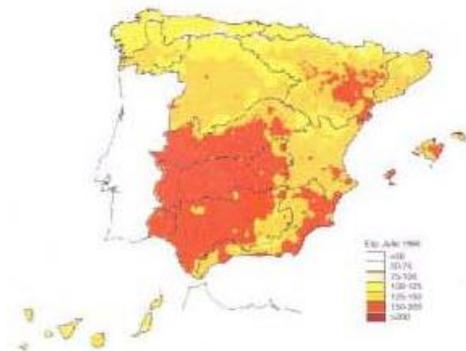


Figura 11. Cálculo de la ETP (mm) según Thornthwaite (julio 1990)



Figura 12. Cálculo de la ETP (mm) según el procedimiento utilizado en el Libro Blanco (julio 1990)

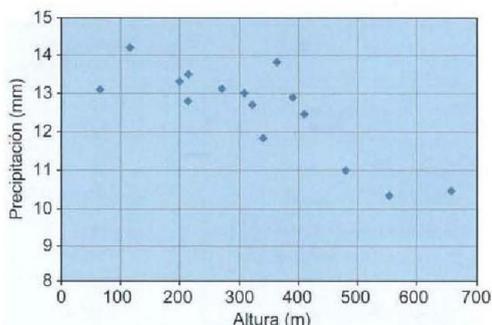


Figura 13. Comportamiento de la temperatura con la altitud en la Cordillera Cantábrica

rectores mensuales antes mencionados se obtuvieron los mapas de evapotranspiraciones potenciales según Penman-Monteith, que a su vez fueron afectados por un coeficiente de vegetación variable en el espacio, aunque invariante en el tiempo. Este coeficiente tiene en cuenta el efecto de la vegetación, ya que no es lo mismo la evapotranspiración potencial en una zona sin vegetación que en otra densamente cubierta por ésta. Este mapa de coeficientes (Figura 14) se obtuvo a partir de los usos del suelo procedentes de CORINNE LAND COVER. Los valores asignados a cada clase de uso suelo (Tabla 1) se estimaron mediante balances hídricos en cuencas aforadas. De esta manera se modificó la evapotranspiración potencial calculada por la fórmula de Penman-Monteith para un cultivo de referencia y se tuvo en cuenta el conocido hecho, demostrado teórica y experimentalmente, de que la evapotranspiración no sólo se controla por factores meteorológicos sino que viene regulada también por el tipo de vegetación.

Como resultado final se obtuvieron los mapas mensuales de evapotranspiraciones potenciales desde el año 1940 hasta el año 1995. La Figura 15 muestra el valor medio anual para ese periodo, que es el que finalmente se ofrece en el Libro Blanco.

Tipo de uso del suelo	Coefficiente de cultivo
Espacios con poca vegetación	80%
Tierras de labor	87%
Sistemas agrícolas heterogéneos	91%
Cultivos permanentes	93%
Vegetación arbustiva	95%
Bosque mixto	97%
Bosques de frondosas y coníferas	98%
Zonas húmedas, superficies de agua y artificiales	100%
Praderas	100%

Tabla 1. Coeficiente reductor de la evapotranspiración potencial en función del de uso del suelo



Figura 14. Coeficiente reductor (x100) de la evapotranspiración potencial según el uso del suelo

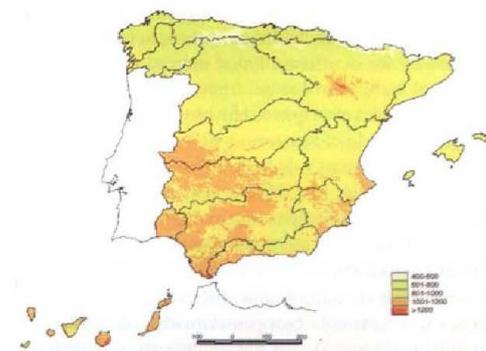


Figura 15. Estimación de la distribución espacial de la ETP media (mm) en España (1940-1995)

CALIBRACIÓN DEL MODELO

La calibración del modelo consiste en ajustar los mapas de parámetros de forma que se reproduzcan satisfactoriamente los caudales en los puntos donde esta información es conocida. La mayoría de los datos de calibración del modelo corresponden a estaciones de aforo donde se miden caudales en régimen natural, aunque también se han utilizado series restituídas a régimen natural procedentes de los Planes Hidrológicos de cuenca. En la Figura 16 se muestran los más de 100 puntos de control seleccionados para la calibración, así como la situación de los embalses y de las zonas de riego, información utilizada para realizar esa selección. Los modelos distribuidos deben superar el problema de estimar los numerosos parámetros que utilizan en sus cálculos, para lo cual el modelo utilizado en el libro Blanco incorpora diferentes herramientas que facilitan el establecimiento de relaciones entre parámetros hidrológicos y características de las cuencas. Tratándose de un modelo distribuido sus parámetros no son escalares, sino matrices representativas de los distintos atributos territoriales considerados: mapas de capacidad



Figura 16. Mapa con la selección de puntos de control para la calibración del modelo

máxima de almacenamiento de humedad en el suelo, capacidad máxima de infiltración y coeficientes de agotamiento de los acuíferos. Estos mapas no se han estimado regionalizando los parámetros calibrados en las cuencas aforadas sino que se han obtenido de forma distribuida para todo el territorio a partir de características físicas de las cuencas y de los acuíferos, tales como usos de suelo, litología, etc. De esta manera los parámetros de las cuencas no aforadas, que cubren un gran porcentaje del territorio, son coherentes con sus características y pueden ser estimados con mayor fiabilidad.

En el proceso de calibración realizado se ha hecho la hipótesis, confirmada con posterioridad, de estacionariedad o invarianza de los parámetros en el periodo de simulación. Esto supone admitir, consecuentemente, la invarianza en los usos de suelo. Aunque, como es obvio, se han producido cambios en los usos de suelo en las últimas décadas en algunas zonas del territorio nacional, su incidencia global sobre las aportaciones de los ríos es muy escasa, como demuestra el hecho de que los residuos (diferencia entre valor observado y simulado) no muestran sesgos a lo largo del periodo de simulación, tal y como más adelante se puede observar en los distintos gráficos de ajuste.



Figura 17. Mapa de capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo (mm)

Uso del suelo	Capacidad máxima de humedad del suelo (mm)
Superficies artificiales	40
Espacios con poca vegetación	100
Tierras de labor en secano	155
Tierras de labor en regadío	215
Praderas y pastizales naturales	150
Sistemas agrícolas heterogéneos	195
Cultivos permanentes	210
Vegetación arbustiva	135
Bosque mixto	220
Bosques de frondosas y coníferas	230
Zonas húmedas, superficies de agua y artificiales	300

Tabla 2 Regionalización de la capacidad máxima de humedad del suelo a partir de los usos del suelo

Este efecto, ciertamente significativo a la escala de la ladera, la parcela o la pequeña cuenca, resulta ser irrelevante a las escalas de las cuencas fluviales estudiadas en el Libro, y su efecto queda ampliamente absorbido por las incertidumbres y ruidos propios de los modelos hidrológicos, aun de los más complejos y parametrizados. En cualquier caso, el modelo no presenta ninguna limitación para tratar parámetros que varían en el tiempo, sino todo lo contrario: el procedimiento seguido permite relacionar los usos de suelo y el parámetro de capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo de forma directa y transparente a través de la Tabla 2. Lamentablemente no existe información para todo el territorio nacional sobre la evolución temporal de los usos del suelo.

En la Figura 17 se muestra el mapa del parámetro de capacidad máxima de almacenamiento de humedad en el suelo, que regula el volumen de agua o excedente que acaba convirtiéndose en escorrentía. Tal como ya se ha mencionado, se ha estimado a partir de información sobre usos del suelo, según la Tabla 2.

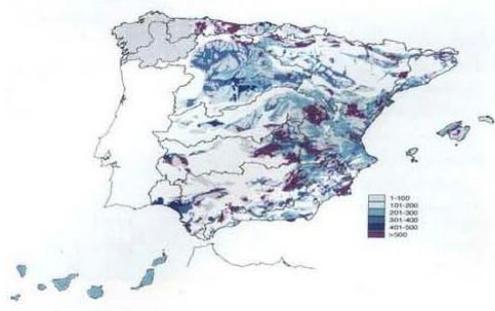


Figura 18. Mapa de capacidad de infiltración máxima (mm)

Litología	Infiltración máxima (mm)
Mat.aluvial de origen indiferenciado	400
Calizas y dolomías	1000
Margas	85
Margas yesíferas	75
Yesos	64
Materiales arenosos	450
Materiales gravo-arenosos	500
Calcarenitas (Macigno)	250
Arcosas	150
Rañas	95
Granitos	65
Rocas metamórficas	20
Gneiss	55
Pizarras	40
Rocas volcánicas	275

Tabla 3. Regionalización de la capacidad máxima de infiltración a partir de la litología

El parámetro capacidad de infiltración máxima (Figura 18), que interviene en la ley que regula el reparto del excedente de agua entre escorrentía superficial e infiltración al acuífero, se ha obtenido básicamente a partir de la litología, según las equivalencias reflejadas en la Tabla 3. Los valores asignados a cada clase litológica en esta tabla proceden del análisis de los flujos base en las estaciones de aforo de los ríos.

El intercambio de agua entre acuífero y río se ha simulado mediante el modelo unicelular, cuyo parámetro denominado coeficiente de agotamiento (Figura 19) se ha obtenido a partir del conocimiento cualitativo del funcionamiento de los acuíferos, de sus propiedades hidrodinámicas, si eran conocidas, y, fundamentalmente, de las curvas de agotamiento de los acuíferos observadas en las estaciones de aforo de los ríos.

Para ofrecer una idea del buen grado de ajuste conseguido con el modelo, en la Figura 20 se muestran los

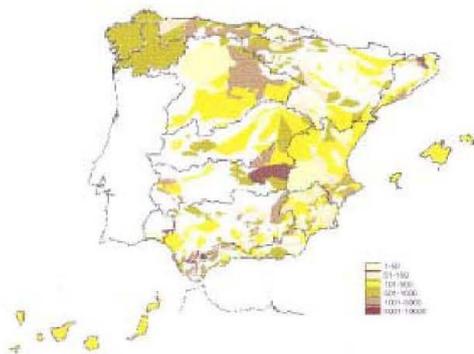


Figura 19. Mapa de coeficientes de recesión (días-1x100.000)



Figura 20. Contraste del modelo en valores medios anuales

valores medios anuales de las aportaciones específicas, simuladas y observadas, en todos los puntos de control seleccionados.

También se representan en las figuras siguientes las series completas de aportaciones mensuales (en m³/s), simuladas y observadas, en distintos puntos de control. Se puede afirmar que la calibración es muy satisfactoria, y lo suficientemente fiable como para permitir la aplicación generalizada del modelo en todo el territorio.

En las Figuras 21 a 29 se muestran los ajustes del modelo en algunos de los puntos de control seleccionados. Los ajustes obtenidos no muestran un sesgo a lo largo de la serie temporal, lo que ratifica la hipótesis de invarianza de los parámetros asumida en el modelo. Incluso series temporales observadas, como la del Tajo en Entrepeñas, que en principio podría parecer que muestra una tendencia descendente desde los años sesenta quizás debida a cambios en los usos del suelo, pueden reproducirse con el modelo a partir de las lluvias y bajo la hipótesis de invarianza de los parámetros de usos del suelo en su cuenca vertiente.

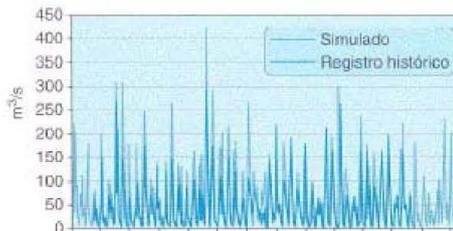


Figura 21. Series mensuales simuladas e históricas del río Miño en Lugo (periodo 1940 ... 1995)

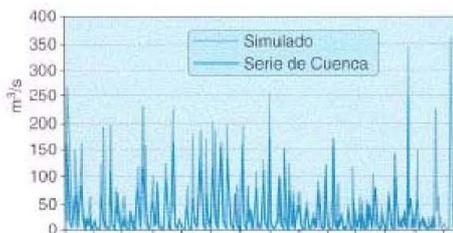


Figura 22. Series mensuales simuladas e históricas del río Alberche (periodo 1940 - 1995)

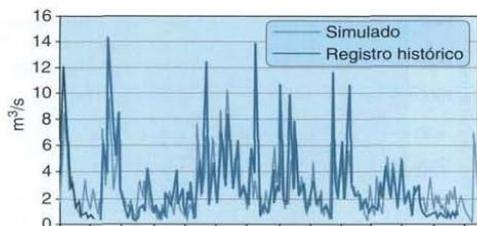


Figura 23. Series mensuales simuladas e históricas del río Guadalquivir en La Cubeta (periodo 1940 – 1995)

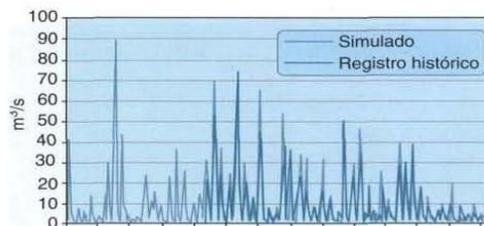


Figura 24. Series mensuales simuladas e históricas del río Guadalquivir en Tranco de Beas (periodo 1940 – 1995)

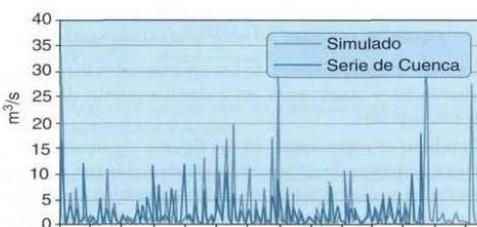


Figura 25. Series mensuales simuladas e históricas del río Turón en Conde de Guadalhorce (periodo 1940 – 1995)

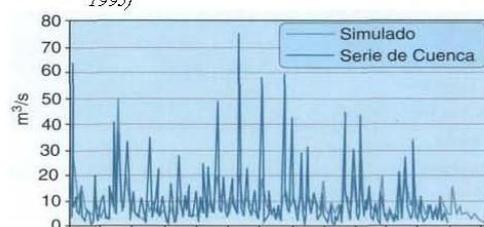


Figura 26. Series mensuales simuladas e históricas del río Segura en Fuensanta (periodo 1940 – 1995)

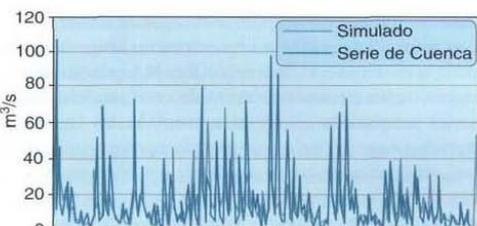


Figura 27. Series mensuales simuladas e históricas del río Júcar en Alarcón (periodo 1940 – 1995)

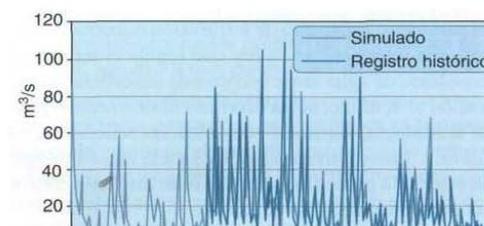


Figura 28. Series mensuales simuladas e históricas del río Tajo en Entrepeñas (periodo 1940 a 1995)

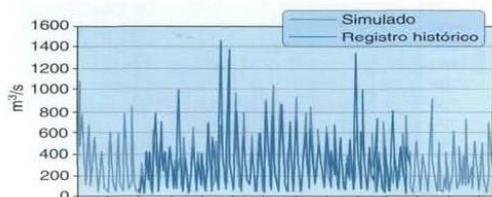


Figura 29. Series mensuales simuladas e históricas del río Ebro en Castejón (periodo 1940 a 1995)

SIMULACIÓN HIDROLÓGICA

Terminada la fase de calibración se procedió a la simulación para el periodo seleccionado (octubre de 1940 a septiembre de 1996). En la Figura 30 se muestra un ejemplo de las distintas variables hidrológicas simuladas con el modelo en uno de los intervalos de tiempo.

Como resultado de la evaluación de recursos realizada el valor medio anual de la escorrentía total en España es

de 220 mm (equivalentes a unos 111.000 hm³), cifra que representa aproximadamente un tercio de la precipitación. En cuanto a la distribución espacial (Figura 31) son evidentes las grandes diferencias territoriales que muestra, variando desde áreas donde la escorrentía es de menos de 50 de mm/año (sureste de España, la Mancha, el valle del Ebro, la meseta del Duero y las Islas Canarias) hasta otras donde supera los 800 mm/año (cuencas del Norte y áreas montañosas de algunas cuencas).

En la Figura 32 se muestra la distribución estacional de la escorrentía. Las reducidas lluvias y las elevadas evapotranspiraciones potenciales de los meses de primavera y verano determinan que en una gran parte del territorio no se genere escorrentía en esos meses. El agua que por tanto circula por los ríos en esa época es la que procede de la descarga de los acuíferos y cuando éstos no existen la escorrentía es prácticamente nula. Con carácter general se puede decir que el agua que marca la abundancia hídrica de un determinado año en muchas regiones de España es la que precipita en otoño e invierno.

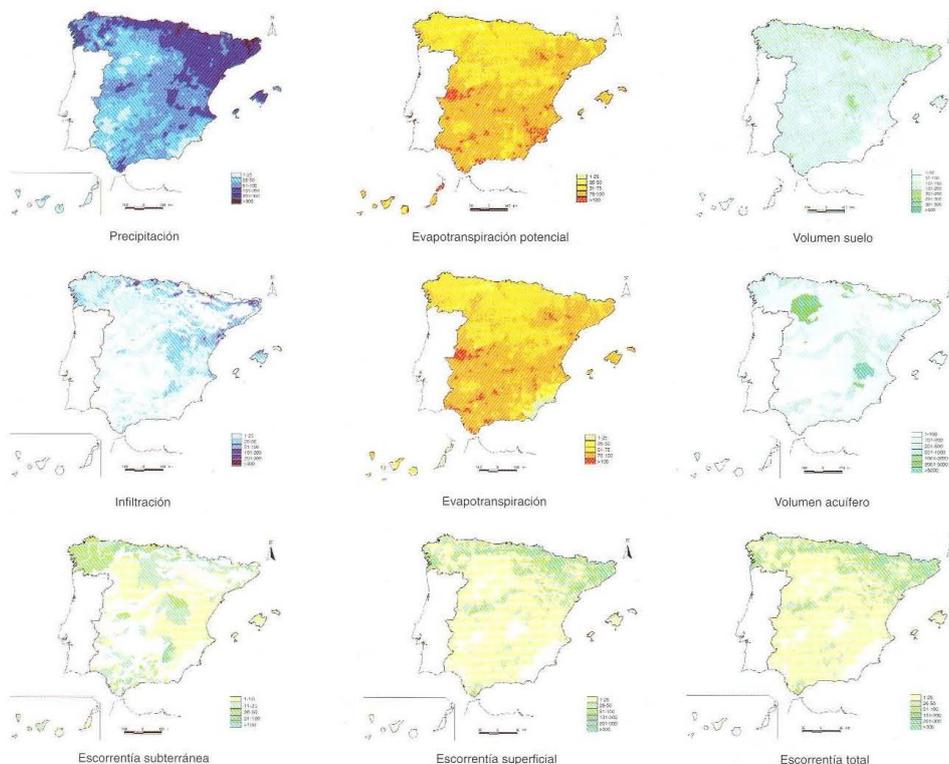


Figura 30. Ejemplos de mapas de variables hidrológicas simuladas con el modelo en el mes de abril 1969

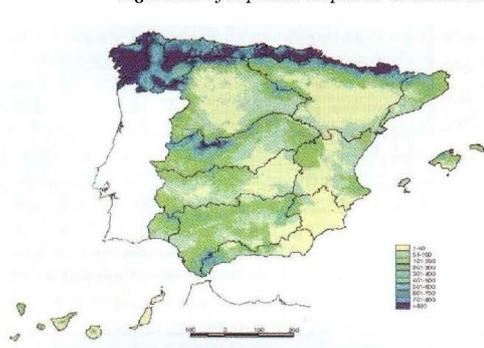


Figura 31. Mapa de escorrentía total media anual en mm (periodo 1940-1995)

En la Figura 33 se ha realizado, a modo ilustrativo, una ampliación del mapa de la escorrentía correspondiente al mes de febrero de 1970 en una parte del territorio nacional, concretamente en Galicia. A partir de ese mapa de escorrentía y del modelo digital del terreno de la zona (Figura 34) se han obtenido de forma automática, mediante un módulo que incorpora el modelo, las aportaciones que circulan por la red fluvial (Figura 35) en ese mes.

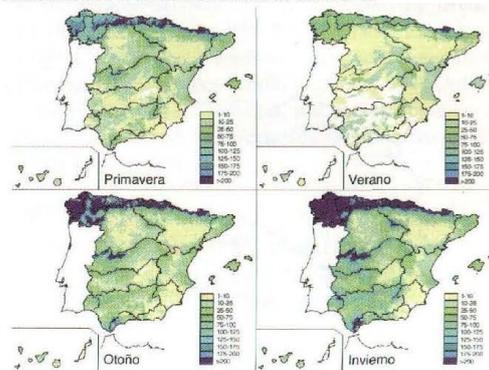


Figura 32. Distribución estacional de la escorrentía (mm)

Dentro del marco de la evaluación de recursos hídricos realizada en el Libro Blanco, y con objeto de disponer también de una evaluación de la recarga natural a los acuíferos en un período común (1940/41 a 1995/96) y con una metodología de cálculo homogénea, se ha realizado, para toda España, con este modelo, una estimación de la recarga debida a la lluvia caída sobre cada unidad hidrogeológica. Esta estimación no tiene en cuenta, por tanto, las transferencias entre unidades que, aun-

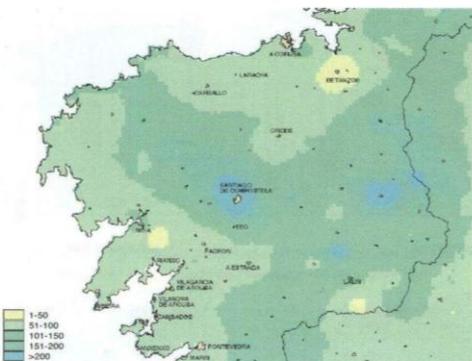


Figura 33. Detalle del mapa de escorrentía (mm) en la zona de Galicia (febrero 1970)

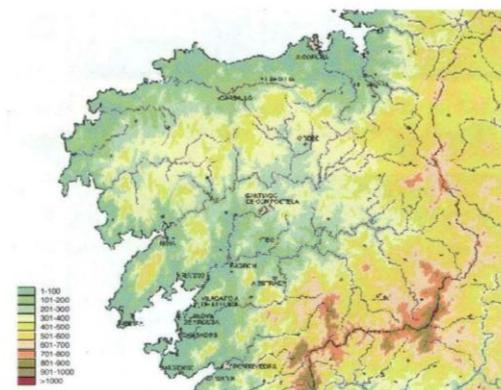


Figura 34. Detalle del modelo digital del terreno en la zona de Galicia (cotas en metros)



Figura 35. Detalle del mapa de aportaciones en la red fluvial (hm^3/mes) en la zona de Galicia (febrero 1970)

que con carácter general son pequeñas, pueden ser importantes en algunas unidades concretas. Tampoco considera, como se dijo, las pérdidas por infiltración en los cauces superficiales. Estas dos componentes de la re-

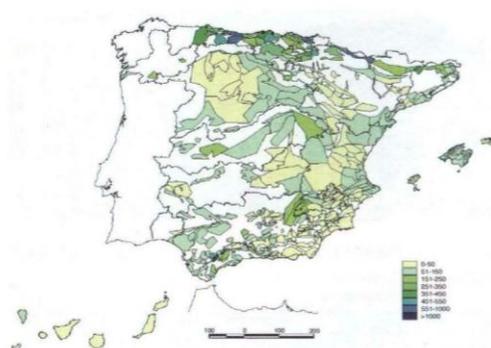


Figura 36. Mapa de recarga natural (infiltración por lluvia directa) en las unidades hidrogeológicas ($mm/año$)

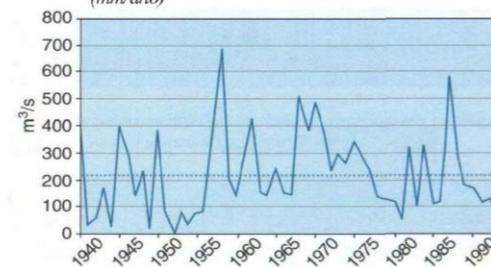


Figura 37. Recarga por infiltración de lluvia ($hm^3/año$) en la unidad hidrogeológica de la Mancha Oriental (periodo 1940/41 a 1995/96)

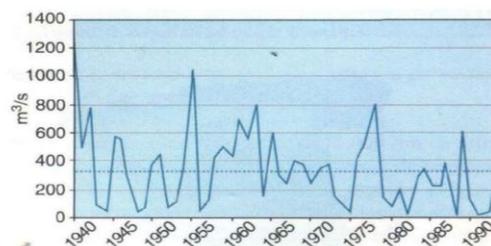


Figura 38. Recarga por infiltración de lluvia ($hm^3/año$) en la unidad hidrogeológica de Madrid-Talavera (periodo 1940/41 a 1995/96)

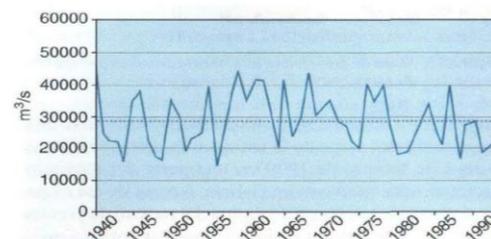


Figura 39. Recarga por infiltración de lluvia ($hm^3/año$) en la Península (periodo 1940/41 a 1995/96)

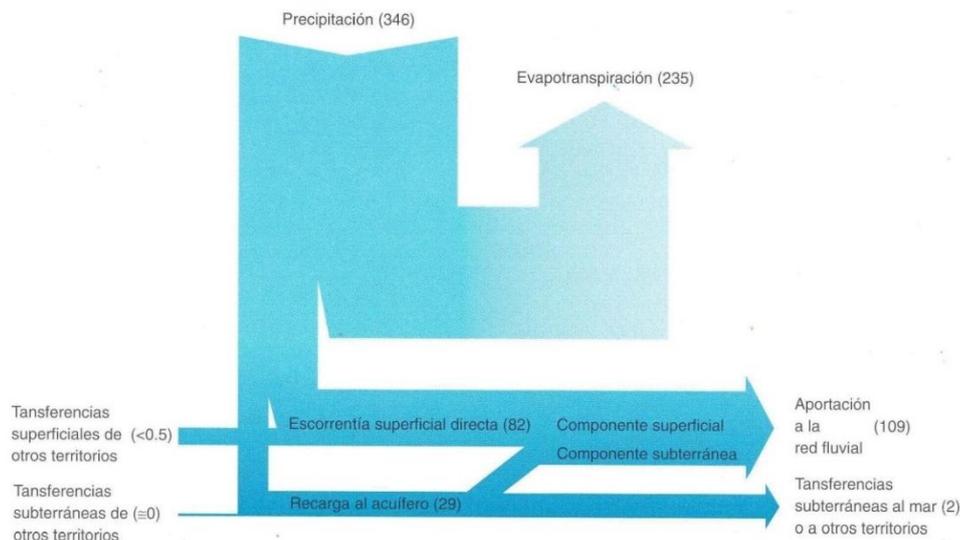


Figura 40. Esquema con los principales flujos de agua (km³/año) en España (periodo 1940-1995)

carga deberían añadirse a la estimación aquí realizada, y aunque globalmente no representan unos valores importantes, pueden ser significativas en algunas unidades concretas. En cualquier caso, como se comprenderá, este análisis particularizado está fuera del alcance de los objetivos del Libro Blanco.

En la Figura 36 se muestran los valores medios anuales de recarga debidos a infiltración por lluvia directa, en mm/año, obtenidos en cada unidad hidrogeológica.

En las Figuras 37, 38 y 39 se muestran las series anuales de recargas por lluvia directa correspondientes a dos unidades hidrogeológicas concretas, la de la Mancha Oriental y la de Madrid-Talavera, así como la correspondiente a todo el territorio peninsular español.

Finalmente, y como gran síntesis de la evaluación de recursos realizada, en la Figura 40 se muestra un esquema con las cifras medias anuales de los principales flujos de agua en régimen natural en España. La aportación total, 111 km³/año, es aproximadamente la suma de la escorrentía superficial directa, 82 km³/año, y la recarga a los acuíferos, 29 km³/año. Esa aportación total puede también dividirse en aportación de la red fluvial, 109 km³/año, y en escorrentía subterránea al mar, 2 km³/año incluyendo las islas.

Con la modelación efectuada se ha podido constatar que la consideración de los últimos 10 años, es decir, el empleo de las series 1940/41-1995/96 en lugar de las habituales 1940/41-1985/86, utilizadas en muchos de los Planes de cuenca, supone, por término medio, casi un 4% de disminución de los recursos naturales totales. En definitiva, y como conclusión, podría resaltarse el hecho de que se ha realizado una compleja y sistemática evaluación de recursos que contempla e integra, para un mismo periodo y con la misma metodología, los datos

de precipitaciones, evapotranspiraciones, usos de suelo, litologías, recargas a los acuíferos y aportaciones en los ríos a la escala de todo el territorio nacional. Esta aproximación pasa a integrarse al acervo tecnológico disponible en nuestro país para una cada vez mejor conocimiento de nuestros recursos naturales.

AGRADECIMIENTOS

Se desea hacer una mención especial en este artículo a Javier Álvarez, del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, por su generosa dedicación a este trabajo, y a Andrés Sahuquillo, Catedrático del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, por su colaboración en algunos aspectos de la modelación relacionados con las aguas subterráneas.

REFERENCIAS

Abbott, M.B.; Bathurst J.C. et al, (1986) *An Introduction to the European hydrological System - System hydrologique european, SHE, 1 : History and phylosophy of a phisically-based distributed modelling system.* Journal of Hydrology, 87 (1986) 45-59.

Burnash, R.J.C.; Ferral, R.L. and McGuire, R.A.,(1973) A Generalized Streamflow Simulation System: Conceptual Modelling for Digital Computers U.S. Department of Commerce, California.

Chairat, S. and J.W.Delleur, (1993) *Integrating a phisically based hydrological model with GRASS.* International Conference on application of GIS in hydrology and water resource management. HYDROGIS. IAHS Publication n° 211. Pages 143-150. Vienna.

EL LIBRO BLANCO DEL AGUA

- Crawford, N.A. and R.K. Linsley, (1966) *Digital Simulation in hydrology; the Stanford Watershed Simulation Model IV*. Technical Report no. 39. Department of Civil Engineering, Stanford University, Stanford, Calif.
- DHI. (1985) *Introduction to the SHE. European Hydrologic System*. Danish Hydraulic Institute.
- Estrela, T. y L. Quintas, (1996a) *A distributed hydrological model for water resources assessment in large basins. Proceedings of 1st International Conference on Rivertech 96. IWRA*. Vol 2, pp 861-868. Chicago, USA.
- Estrela, T. y Quintas, L., (1996b) *El sistema integrado de modelización precipitación - aportación SIMPA*. *Revista de Ingeniería Civil*, nº 104, páginas 43-52. CEDEX - Ministerio de Fomento, 1996
- MIMAM, (1998) *El Libro Blanco del Agua en España*. Ministerio de Medio Ambiente. Diciembre. Madrid, España.
- Ruiz, J.M., (1998) *Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual distribuido de simulación continua integrado con un SIG*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Témez, J.R. (1977) *Modelo matemático de transformación-Aportación*. ASINEL.
- Van Deursen, J.C.J. Kwadijk, (1993) *RHINEFLOW: an integrated GIS water balance model for the river Rhine W.P.A. International Conference on application of GIS in hydrology and water resource management. HYDROGIS*. IAHS Publication nº 211. Pages 507-518. Vienna.



Unión Europea

Fondo Europeo
de Desarrollo Regional



JUNTA DE ANDALUCÍA