



Simulación de caudales de los ríos Nervión e Ibaizabal. País Vasco

Llanos, Hilario ¹ ✉ - Bâ, Khalidou ²

Recibido: 14 de abril de 2011 • Aceptado: 22 de julio de 2011

Resumen

Se ha establecido el comportamiento hidrológico del sistema de cuencas de los ríos Nervión e Ibaizabal en base a la aplicación del modelo Cequeau. El estudio se ha abordado para establecer sus recursos globales y reproducir a paso diario los caudales correspondientes a un periodo de observación de ocho años, teniendo en consideración las distintas características fisiográficas presentes en las subcuencas que componen el sistema, mediante la discretización espacial de las mismas. En este sentido, se ha constatado la especial incidencia que sobre la dinámica fluvial tienen las características estructurales y, especialmente, las de tipo litológico, ya que el sistema en su totalidad se haya intersectado por unidades hidrogeológicas de importancia regional, cuyos funcionamientos específicos afectan de un modo diferencial y de manera sectorial a los hidrogramas observados. Además, se ha puesto de manifiesto la influencia sobre el régimen hidráulico de la gestión intracuencas que se realiza en la cabecera del sistema entorno a la presa de Undurruga, para el abastecimiento del Gran Bilbao y su comarca, en base a un transvase que tiene su origen en los embalses de la vecina cuenca del río Zadorra. Los resultados obtenidos son altamente satisfactorios y ponen en evidencia la validez del modelo analizado que, dado su carácter distribuido, se presenta como un elemento operacional extremadamente flexible a las necesidades actuales, pudiéndose incorporar tanto a la previsión de avenidas como a estudios de planificación hidráulica sectorial.

Palabras clave: Hidrología, cuenca Nervión-Ibaizabal, modelos matemáticos, Cequeau, País Vasco.

Abstract

The hydrologic behaviour of the Nervión and Ibaizabal rivers basin system is established by applying the Cequeau model. The research is raised in order to establish its global resources and replicate the daily discharges for an eight year period, taking into account the different physiographic characteristics of the sub-basin that compose the system, through their areal discretization. That way, the special importance of the watershed structural characteristics and, specially, the lithologic ones, over the fluvial dynamic response has been shown, since the whole system is intersected by different regional importance hydrogeological units which affect the observed hydrographs in a different and regional way. Moreover, it is shown that the basin management carried out for the water supply of Bilbao and its region, on the basis of a decant that take place in the reservoirs of the Zadorra river basin, in the heading of the system close to the Undurruga dam, has a high influence over the analyzed

1 Universidad del País VascoUPV/EHU. Departamento de Geodinámica. 1006 Vitoria-Gasteiz, País Vasco

✉ gpplach@vc.ehu.es

2 Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Interamericano de Recursos del Agua. Facultad de Ingeniería, Cerro de Coatepec, C.U., Toluca, Estado de México, C.P.50130

hydraulic behaviour. The obtained result are highly satisfactory and assert the validity of the employed model that, taking into account its spread character, is shown as an extremely flexible operational element to the present needs, which could be included in the flood forecast and in the regional hydraulic planning studies.

Keywords: Hydrology, Nervión-Ibaizabal basin, mathematical models, Cequeau, Basque Country.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la disponibilidad de los recursos hídricos, permite a los países planificar el uso y conservación racional de los mismos a través del diseño de planes maestros multidimensionales basados en la política y estrategia de desarrollo definida por cada país tanto en el ámbito nacional como en el internacional (*UNESCO 1995*). Para alcanzar este objetivo, el uso de los modelos hidrológicos es una herramienta imprescindible y de gran utilidad (*Llamas 1985*). A lo largo del tiempo, se han venido utilizado diferentes modelos hidrológicos para analizar las magnitudes de las variables que intervienen en el ciclo del agua, siendo así que en el campo de la Hidrología aplicada, la mayoría de los modelos tienen por finalidad la estimación de los recursos hídricos globales de una cuenca vertiente.

En la práctica, un modelo de simulación de caudal es útil para resolver un importante número de problemas hidrológicos tales como la reconstitución y generación de largas series de datos para la evaluación de recursos y el dimensionamiento de obras hidráulicas, entre otros, la detección de errores de observaciones y la estimación de caudales en puntos no aforados de la red hidrográfica, así como en la explotación de embalses y en el análisis y previsión de avenidas asociadas a eventos meteorológicos de carácter extremo. De forma complementaria, y con un enfoque multidisciplinar, los modelos hidrológicos son igualmente útiles para el desarrollo de proyectos ambientales y para el estudio de la calidad química del agua de un río; ejemplo de ello son los modelos de simulación del transporte de contaminantes e incluso los de simulación de los niveles de un acuífero en zonas agrícolas, entre otros.

Existen dos tipos de modelos de simulación lluvia-escurrimiento, los agregados y los llamados distribuidos. En los primeros las variables meteorológicas y fisiográficas son promediadas en el conjunto de la cuenca y en los modelos distribuidos, que representan un avance significativo en la investigación hidrológica, se posibilita el tener en cuenta la variabilidad espacial de la lluvia y de los diferentes parámetros que intervienen en cada proceso tales como evapotranspiración, infiltración, escorrentías hipodérmica y subterránea. Esta característica de los modelos distribuidos se fundamenta en la evidencia de que en una misma cuenca existe una variabilidad espacial natural de la precipitación, de los parámetros de infiltración y de la estructura de la red de drenaje.

Así pues, la tendencia actual es el desarrollo y utilización de modelos distribuidos a pesar de que en muchos estudios aún se siguen aplicando los llamados modelos agregados en los que la variabilidad espacial de la precipitación y demás características se pierde al quedar promediadas en el conjunto de la cuenca (*HEC 1981; Jordan y Wisner 1983; USACE 1991; Quinn et al. 1995*). En este sentido, en el presente artículo se presenta la aplicación del modelo distribuido Cequeau (*Morin et al. 1981*) para la generación de caudales diarios y el análisis global del ciclo hidrológico en las diferentes subcuencas que componen el

sistema de cuencas formado por los ríos Nervión e Ibaizabal, integrantes ambos de la vertiente cantábrica del País Vasco (Figura 1).

EL SISTEMA NERVIÓN IBAIZÁBAL

EL sistema hidrológico Nervión Ibaizabal constituye con diferencia la arteria fluvial más importante de la Comunidad Autónoma Vasca, ya que abarca más de la mitad de la superficie de la provincia de Bizkaia y parte de la de Araba, internándose incluso en territorio burgalés por su extremo Suroeste, si bien con carácter puntual (Figura 1). Su importancia se ha visto incrementada por el elevado número de núcleos poblacionales e industriales que de antaño se han asentado en sus márgenes especialmente en los tramos bajos del sistema. Al estar limitado por la divisoria de aguas existente entre las vertientes cantábrica (Norte) y mediterránea (Sur) y situarse muy cerca de la costa los ríos que lo integran deben salvar en su recorrido grandes desniveles por lo que presentan pendientes acusadas, factores éstos que, unidos a las características climáticas existentes en la zona, son la causa de su elevada torrencialidad y de frecuentes crecidas, como las que tuvieron lugar en el mes de agosto de 1983 y posteriormente, y que causaron graves daños materiales y pérdidas humanas (*DGPV 1985; DFV 1984*).

El sistema presenta una superficie aproximada de 953 km², incluyendo las cuencas de los ríos Nervión e Ibaizabal, hasta su unión en las cercanías de Basauri. La cuenca del Nervión tiene una superficie de 536 km² extendiéndose el cauce en dirección Sur Norte con un recorrido de unos 55 km desde la sierra de Guillarte (Araba) que constituye el límite más meridional de la divisoria de aguas en territorio vasco. En un primer tramo de su cabecera el río normalmente no lleva agua salvo en períodos de intensas lluvias o deshielo, y pasa a presentar un régimen permanente únicamente al pie de los escarpes de la Peña de Orduña, tras salvar una cascada superior a los 100 m de desnivel. Posteriormente, tras atravesar la depresión de Orduña, condicionada por la existencia de una estructura diapírica (*ITGE 1990; EVE 1996*), llega a la localidad de Llodio donde recibe las aportaciones de los ríos Altube y Arnauri, procedentes del macizo del monte Gorbeia (1475 m).

La cuenca del Ibaizabal, con una superficie de 417 km², se sitúa al Noreste de la del Nervión comprendiendo una gran planicie central en torno a la localidad de Durango y valles aledaños, entre los que destaca el de Arratia por donde discurre el río del mismo nombre. La cuenca limita al Sur y al Sureste con el macizo del monte Gorbeia que la separa de las cuencas del Nervión y del Ebro, al Oeste y Sureste con los macizos de los montes de Anboto (1327 m) y Udalaiz (1093 m) respectivamente, y por el Norte con los montes del Oiz (1029 m). Con una longitud total de 43,5 km atraviesa desde el valle de Atx-ondo, y en sentido Suroeste Noroeste, gran parte de Bizkaia alojado en el sinclinal de Bilbao (*EVE 1996*), cuya estructura determina el trazado del cauce principal hasta su confluencia con el río Nervión. El río Arratia, cuyas aportaciones naturales derivan en su mayoría del macizo del monte Gorbeia, constituye un río muy especial

ya que se encuentra afectado en su cabecera por la presa de Undurraga utilizada en el trasvase que se efectúa desde la vecina cuenca del río Zadorra.

El sistema está fuertemente intervenido por el hombre siendo los principales usos del suelo los agropecuarios y forestales con

replantaciones de coníferas, especialmente de pino (Figura 2). Por otra parte, se encuentra muy industrializado, especialmente en su tramo final desde Basauri donde se encuentran los núcleos poblacionales e industriales más densos de Bizkaia que constituyen el Área Metropolitana de Bilbao.

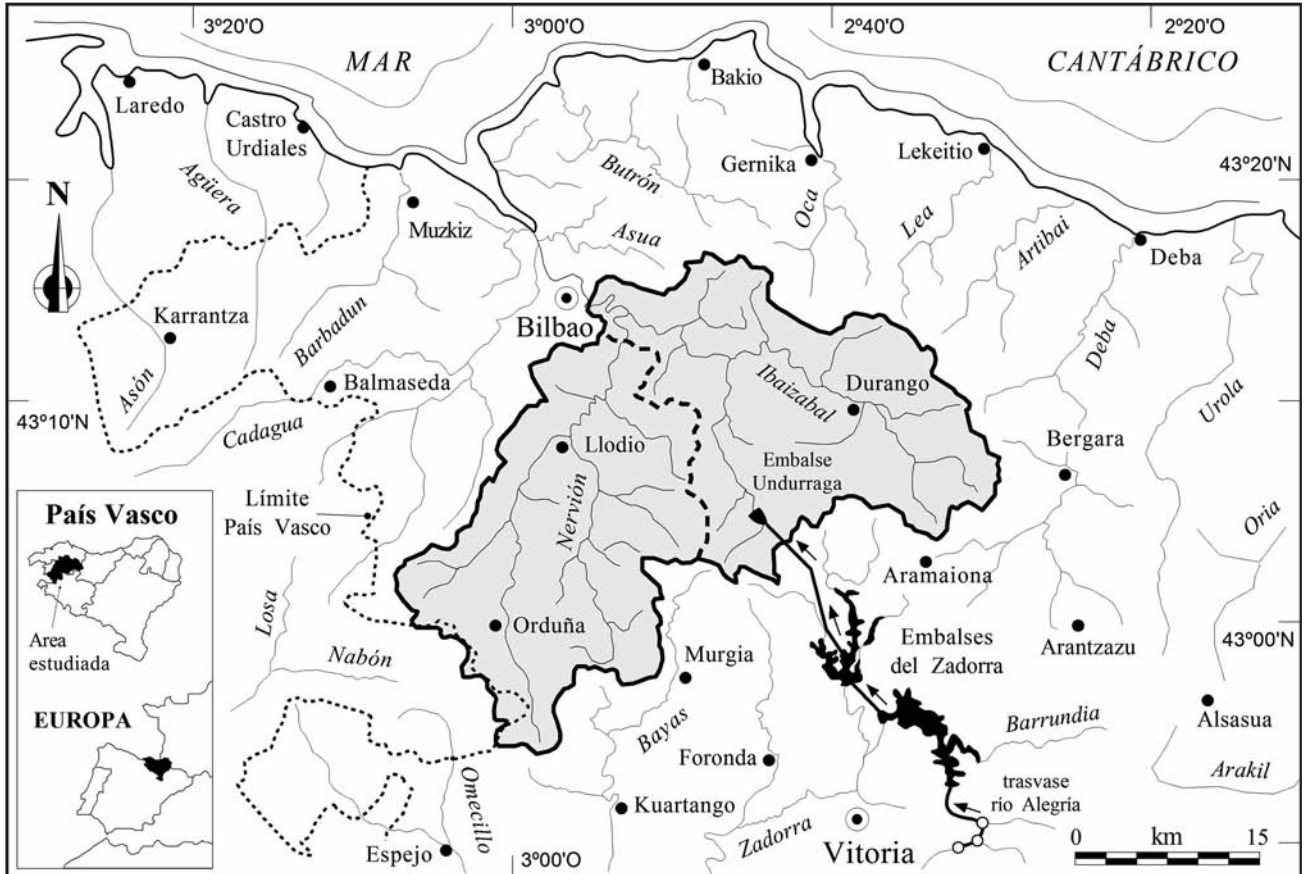


Figura 1. Localización del sistema Nervión Ibaizabal.

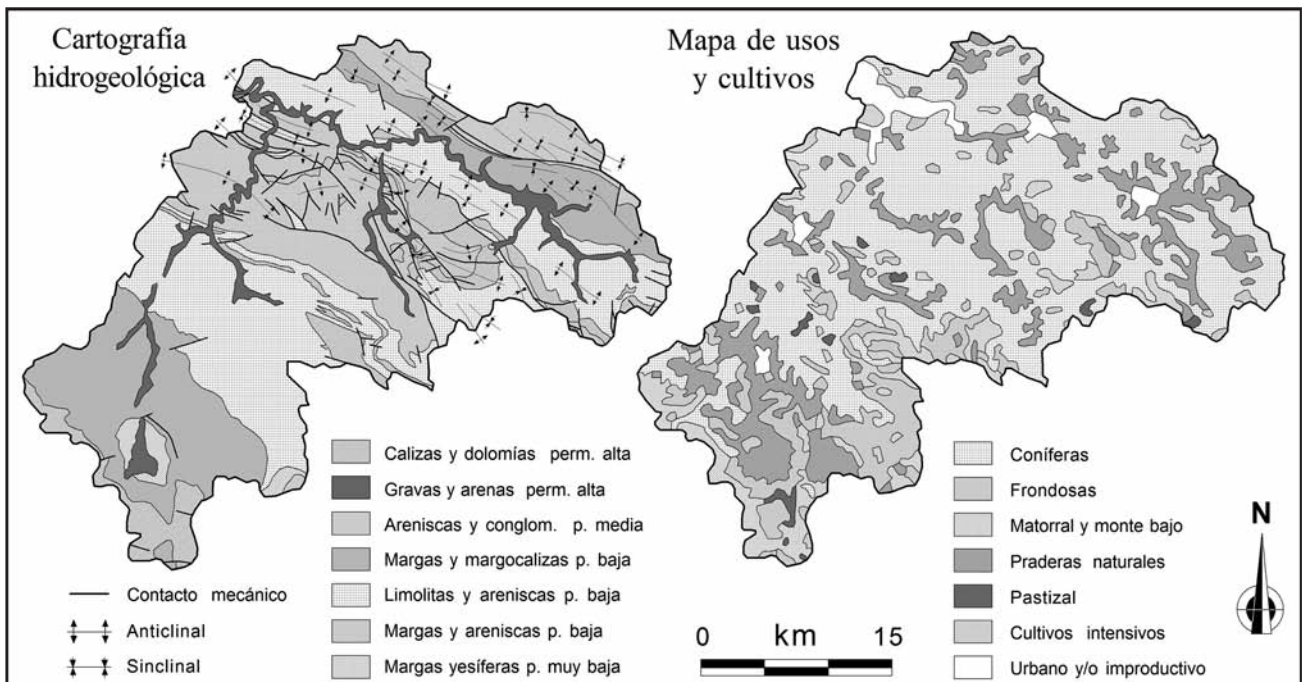


Figura 2. Cartografía hidrogeológica (establecida a partir de ITGE 1990) y mapa de cultivos y aprovechamientos (MAPA 1987).

Desde el punto de vista geológico el sistema de cuencas pertenece a la parte central de la Cuenca Vasco Cantábrica (ITGE 1990; EVE 1996) limitado de Norte a Sur por dos grandes unidades estructurales, el Sinclinorio de Bizkaia y la Plataforma Monoclinal Alavesa, entre las que se aloja el llamado Anticlinorio de Bilbao, el cual constituye una amplia banda de materiales cretácicos sumamente compleja que, en dirección Noroeste Sureste, cubre la mayor parte de la zona de estudio. Los materiales con una mayor representación son de naturaleza calcárea y alternan con secuencias de arcillas y areniscas en respuesta a los distintos cambios que tuvieron lugar en las condiciones de sedimentación en la Cuenca Vasco Cantábrica, lo que dio lugar a numerosos e importantes cambios laterales de facies entre las unidades sedimentarias (Figura 2).

A efectos de establecer el comportamiento del sistema interesa analizar las características hidráulicas de los materiales, y, en este sentido, hay que señalar la existencia de cuatro unidades hidrogeológicas de importancia regional, de las cuales una está constituida por areniscas y conglomerados, unidad de Oiz (EVE 1996), y el resto por calizas de desigual litología y edad, unidades de Aramotz, Itxina y Subijana (Antigüedad 1986; EVE 1996; Garfias y Llanos 2001). A excepción de la unidad de Oiz cuyos materiales muestran una permeabilidad por porosidad intergranular con escasa incidencia en el sistema, el resto y especialmente las unidades de Aramotz y Subijana afectan de un modo desigual a la dinámica fluvial.

El grado de afectación es variable en función del nivel de karstificación de sus materiales y de su ubicación en el sistema. Así la de Aramotz, con una circulación subterránea aprovechando la red de fracturas y la porosidad primaria de las calizas condiciona una descarga adicional claramente desfasada a través de sus manantiales hacia la cuenca del río Ibaizabal. Por su parte, la unidad de Subijana, aflorante en el curso alto de la cuenca del río Nervión, al Sur del diapiro de Orduña, forma parte de una amplia plataforma natural de materiales calizos cuyas condiciones estructurales posibilitan el tránsito de parte de sus recursos superficiales hacia las cuencas anexas situadas fuera del sistema a través de sus niveles karstificados.

EL ABASTECIMIENTO AL GRAN BILBAO

El sistema de cuencas de los ríos Nervión e Ibaizabal tiene la particularidad de estar afectado de trasvases desde cuencas adyacentes al objeto de garantizar el abastecimiento de la Comarca del Gran Bilbao (CAGB 1995), situada en la parte baja del sistema, que incluye un conjunto de 25 municipios. El Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia es actualmente la entidad responsable de la prestación de dicho servicio a aproximadamente un millón de habitantes de la provincia de Bizkaia. La gestión del ciclo completo se inicia con la captación del agua en los embalses de Ullibarri Ganboa y Urrunaga ubicados en la cuenca del río Zadorra, situada inmediatamente al Sureste del sistema en estudio. Las presas, de planta recta con contrafuertes de cabeza redonda, están enlazadas mediante una galería forzada de 3.551 m. de longitud y 2,5 m de diámetro (ASZ 1958) lo que permite el trasvase entre ambos embalses al objeto de mantenerlos sensiblemente al mismo nivel (Figura 3).

El dispositivo se completa con una segunda galería forzada, de 12.502 m. de longitud y 4,25 m. de diámetro, capaz de aportar un caudal máximo de 54 m³/seg, que tiene su origen en el embalse de Urrunaga y en cuyo extremo se localiza una chimenea de equilibrio que da paso a un pozo en carga, de 431 m. de longitud y 329 m. de desnivel, que enlaza con las turbinas de la central subterránea de Barazar para producción de energía hidroeléctrica, con una potencia instalada de 171.000 KW. Finalmente, de la central arranca un socaz en túnel de 1.024 m. de longitud para evacuación del agua hasta la cuenca alta del río Arratia, tributario del río Ibaizabal.

Es precisamente en este punto donde se localiza el embalse de Undurruga al que afluyen procedentes del sistema Zadorra una media de 176 hm³/año de los cuales un 55% se derivan mediante bombeo a la estación de tratamiento de agua potable de Venta Alta (Figura 3) con destino al abastecimiento y el resto (45%) se vierte directamente al cauce situado aguas abajo de la presa. Este esquema se complementa con las aportaciones secundarias procedentes del sistema Kadagua (pantanos de Ordunte, Oiola, Artiba y Nosedal), de captaciones directas del río Arratia y de otros pequeños embalses situados en la propia cuenca del Nervión (presas de Lekubaso y Zollo).

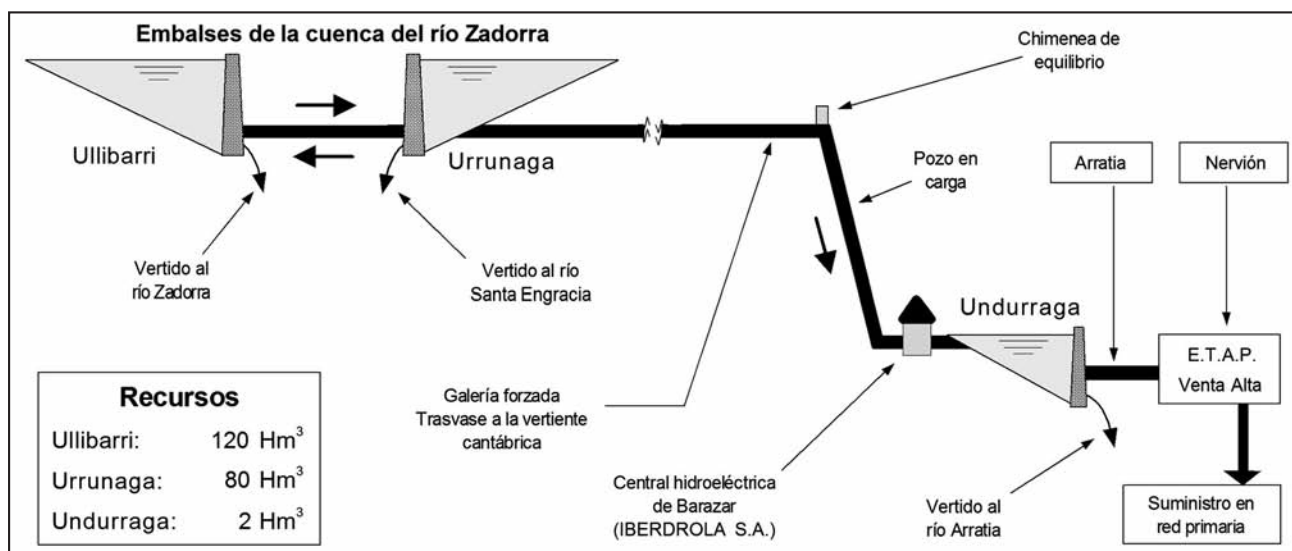


Figura 3. Sistema principal de abastecimiento del Gran Bilbao (modificado de CAGB 1995).

EL MODELO CEQUEAU

El modelo hidrológico Cequeau ha sido desarrollado en el INRS-EAU de la Universidad de Québec para reproducir el fenómeno de la escorrentía en una cuenca vertiente (Morin et al. 1981; Morin y Paquet 2007). Se trata de un modelo de parámetros distribuidos de uso flexible, que permite simular tanto los hidrogramas de descarga como importantes aspectos de la calidad del agua y su evolución a lo largo de un cauce, todo ello a pasos de tiempo variables que van desde una hora hasta un día. El modelo ha sido utilizado en varias cuencas de diferentes países de América, Europa y África para la gestión de recursos (Morin et al. 1982; Ayadi y Bargaoui 1998; Llanos et al. 1999; Bâ et al. 2001, 2009) y, así mismo, ha sido integrado en estudios de la Organización Meteorológica Mundial (WMO 1992) para su uso alternativo y/o comparación con otros modelos hidrológicos.

Al tratarse de un modelo distribuido tiene en cuenta las características fisiográficas de la cuenca y sus variaciones, tanto en el espacio como en el tiempo, como la cubierta vegetal y usos del suelo, hidrogeología, la red de drenaje, etc.; un ejemplo de ello son los documentos gráficos representados en la Figura 2 citados con anterioridad. Ello es posible gracias a que posibilita la descomposición de la cuenca en elementos cuadrados enteros, de igual dimensión, y en elementos parciales que resultan de la subdivisión de un elemento entero en un máximo de cuatro elementos menores definidos por la existencia bien de divisorias hidrográficas naturales o de infraestructuras hidráulicas como grandes canales de drenaje, trasvases y embalses para la regulación de recursos. Esta subdivisión permite tener en cuenta la influencia de la topografía de la cuenca en la generación y posterior vehiculización de la escorrentía. Además, el modelo permite calcular los caudales tanto en puntos de una cuenca donde se realiza un control continuo de los mismos como en puntos no aforados y, así mismo, ofrece la posibilidad

de simular la existencia de almacenamientos artificiales y de efectuar previsiones a diferentes plazos de tiempo.

El proceso de transformación de la lluvia en escorrentía requiere de los siguientes tres tipos de datos: fisiográficos, meteorológicos e hidrológicos. En relación con los primeros, hay que establecer para cada uno de los elementos cuadrados la altitud absoluta en metros y el porcentaje de bosques, cultivos, lagos, embalses y humedales naturales. Del mismo modo se han de integrar las características hidrogeológicas de la cuenca definiendo diferentes sectores con litologías y comportamientos hidráulicos similares, lo que facilita el establecimiento de los parámetros relacionados con la infiltración. De los datos meteorológicos, hay que diferenciar entre la precipitación líquida y la precipitación en forma de nieve, además, se precisa de las series de temperaturas del aire, máximas y mínimas, dado que controlan la fusión de la nieve. En cuanto a los datos hidrológicos se deben conocer las aportaciones registradas en las estaciones de aforo que se desean analizar, a fin de verificar el grado de ajuste con los caudales calculados por el modelo.

El modelo se encuentra estructurado en dos módulos principales que, en conjunto, tratan de describir las diferentes etapas del agua desde que alcanza la superficie de la cuenca hasta su llegada a la desembocadura de la misma bajo la forma de escorrentía, tanto superficial como subterránea (Figura 4). El primero de ellos se denomina función de producción y el segundo se conoce como función de transferencia. La función de producción tiene por objeto representar el movimiento vertical del agua, esto es, los diferentes procesos físicos por los que atraviesa el agua desde su precipitación hasta que está disponible como lluvia neta, apta para incorporarse a la escorrentía. Estos procesos son simulados, mediante la representación del suelo y del conjunto de materiales subyacentes bajo la forma de reservorios comunicantes, con la ayuda de expresiones matemáticas que reproducen las diferentes componentes que intervienen en el ciclo hidrológico.

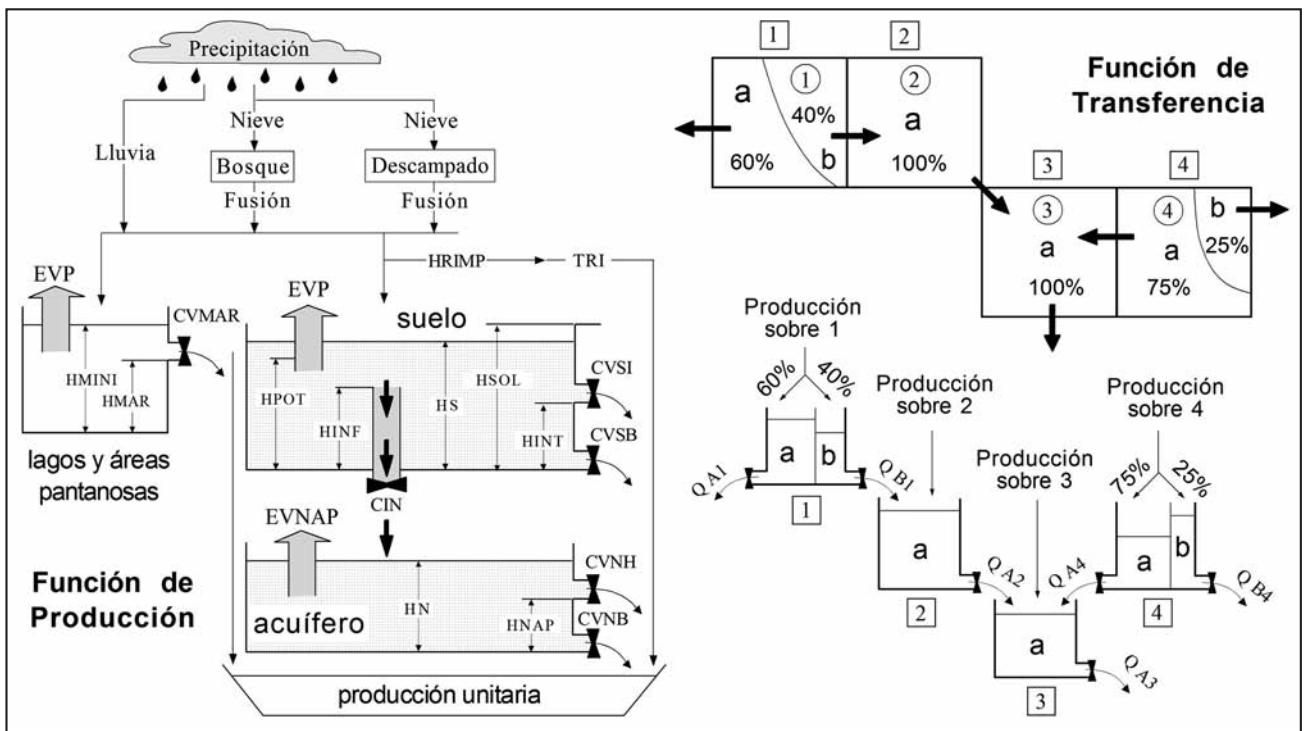


Figura 4. Funciones de producción y transferencia del modelo Cequeau.

La primera etapa de la función de producción establece para el recipiente denominado "suelo" (Figura 4) la lámina de agua procedente de la precipitación líquida y la derivada de la fusión de nieve, cuando exista, la cual se adiciona a la reserva de agua en el suelo, operación que realiza el modelo para cada elemento de la cuenca e intervalo de tiempo, en nuestro caso día del año. En el supuesto de la existencia de nieve los equivalentes en agua (mm) para la nieve existente en zona boscosa y no boscosa se establecen, respectivamente, mediante:

$$Nfb = C_1 \cdot \max[0, Tje - Tsc] \cdot hr \quad Nfsb = C_2 \cdot \max[0, Tje - Tsc] \cdot hr \quad (1)$$

siendo C_1, C_2 las intensidades potenciales de fusión en zona boscosa y no boscosa (mm/°C/día)

Tsc, Tsd los umbrales de temperatura de fusión en zona boscosa y no boscosa (°C)

hr un factor de tiempo (día)

Tje la temperatura media en el elemento cuadrado (°C)

Por su parte, las pérdidas ocasionadas por la acción combinada de la evaporación y la transpiración de la vegetación se calculan para cada intervalo de tiempo seleccionado mediante la fórmula de *Thornthwaite (1957)* modificada, teniendo en cuenta la duración potencial de la insolación en función de la latitud y del día del año, así como el estado de saturación del suelo, tal que:

$$Ethorn = \frac{10}{30,4} \cdot 1,62 \left[\frac{10Tje}{Xit} \right]^{Xaa} \quad (2)$$

siendo $Ethorn$ la evapotranspiración potencial (mm)

Tje la temperatura media sobre el elemento considerado (°C)

Xaa un exponente (adim)

Xit valor del índice de Thornthwaite (adim)

Siguiendo con el esquema precedente, las escorrentías superficial y retardada dependerán del nivel de agua en el suelo, de los coeficientes empíricos de vaciado y de las propias cotas de vaciado de este reservorio, de acuerdo con las expresiones:

$$Es = Hs - Hsol \quad Er_1 = \max(0, [Hs - H_{int}] \cdot Cvs_1) \quad Er_2 = [Hs - Er_1] \cdot Cvs_b \quad (3)$$

siendo Es la escorrentía superficial (mm)

$Hs, Hsol$ nivel de agua en el suelo y altura del reservorio "suelo" (mm)

Er_1 y Er_2 las escorrentías retardadas procedentes de los orificios alto y bajo (mm)

H_{int} el umbral de vaciado alto (mm)

Cvs_1, Cvs_b los coeficientes de vaciado alto y bajo (adim)

En este sentido, la escorrentía superficial tiene lugar cuando la altura de agua disponible en el suelo es superior a la altura del reservorio; es decir, cuando la intensidad de la lluvia es mayor que la capacidad de infiltración del suelo. La escorrentía retardada se produce si la altura de agua en el reservorio es superior al umbral del orificio de vaciado, o en otras palabras, cuando el volumen de agua infiltrada es mayor que el déficit

de humedad del suelo. De este modo, las escorrentías superficial e hipodérmica generadas en cada elemento son adicionadas al movimiento de agua que tiene lugar en las superficies impermeables, para dar lugar a una parte de la lámina de agua finalmente disponible para su incorporación a los cauces.

Existe todavía una parte de agua procedente del suelo que, siempre y cuando exista un acuífero subyacente, se va a infiltrar a través de la zona no saturada, alimentando directamente a un segundo reservorio ("acuífero", Figura 4). Las salidas o aportaciones que se deriven de dicho reservorio dependerán de la posición del nivel piezométrico en el acuífero, de sus coeficientes de vaciado y de dos alturas de vaciado definidas para diferentes situaciones hidráulicas, tal que:

$$Snap_h = Cvn_h \cdot \max[0, Hn - Hnap] \quad Y \quad Snap_b = Cvn_b \cdot Hn \quad (4)$$

siendo $Snap_h, Snap_b$ las escorrentías de vaciado alto "rápido" y bajo "lento" (mm)

Cvn_h, Cvn_b los coeficientes de vaciado alto y bajo (adim)

Hn la cota del nivel piezométrico (mm)

$Hnap$ el nivel de vaciado alto del reservorio (mm)

Estas aportaciones se suman a las láminas de agua preexistentes, determinando la cantidad total de agua disponible para su incorporación a los cauces. Dicha incorporación se efectúa de elemento en elemento, de acuerdo con la estructura de la función de transferencia. Este proceso, que puede seguirse en la Figura 4, está básicamente controlado por dos parámetros, el tiempo de concentración de la cuenca y un coeficiente de transferencia específico para cada celda, relacionado con las características hidráulicas de la misma de acuerdo con:

$$Xkt_i = 1 - e \left[- \min \left(36, \frac{Exxkt \cdot Rma}{\max(Sl, Slac)} \cdot \frac{100}{Cekm} \right) \right] \quad (5)$$

siendo $Xkti$ el coeficiente de transferencia del elemento i (adim)

$Exxkt$ el parámetro de cálculo del coeficiente (adim)

Rma el porcentaje acumulado de la superficie de los elementos situados aguas arriba (%)

$Sl, Slac$ la superficie y porcentaje de la superficie de agua en el elemento (km², %)

$Cekm$ la superficie de los elementos enteros (km²)

La función de producción, por tanto, está orientada a la obtención de un volumen de agua disponible para ser inmediatamente transferida. Esta transferencia se efectúa de elemento en elemento. El volumen de agua disponible sobre cada elemento parcial se obtiene multiplicando la lámina de agua producida sobre el elemento entero por la superficie del elemento parcial considerado. Este volumen es añadido a los volúmenes entrantes a este elemento, procedentes de los elementos parciales adyacentes situados en una posición estructural e hidráulica superior (Figura 4).

El modelo Cequeau permite además la existencia en una cuenca de presas reales o incluso ficticias, al objeto de simular posibles trasvases y derivaciones diversas. El procedimiento de cálculo se describe sintéticamente en la Figura 5. La parte izquierda de la Figura reproduce la presencia de una presa a la salida del elemento parcial ICP, en tanto que a su derecha se muestra la esquematización efectuada por el modelo, situando

la presa entre los elementos ICP e ICPAV, este último localizado inmediatamente aguas abajo, de modo que el volumen de agua V_e (m^3) entrante a una presa situada en un elemento parcial ICP está determinado por:

$$V_e = Xkt_{ICP} \cdot Volcp_{ICP} \quad (6)$$

siendo Xkt_{ICP} el coeficiente de transferencia del elemento ICP (adim)

$Volcp_{ICP}$ el volumen de agua disponible en el elemento ICP (m^3)

Hay que indicar que el coeficiente de transferencia en la práctica debe de ser cercano a 1 puesto que se entiende que en una presa el agua está en principio inmediatamente disponible para su evacuación.

El volumen evacuado de la presa (VBAR), para un paso de tiempo concreto y calculado de diferente modo según se trate de una presa real o ficticia, es transferido al elemento siguiente aguas abajo (ICPAV) incorporándose al flujo superficial en el cauce. En el caso de una presa real los vertidos son conocidos y constituyen parte de los datos hidrométricos de entrada al modelo, en tanto que en una presa ficticia son calculados por el método de *Goodrich (1931)* a partir de la ecuación de continuidad:

$$\frac{2V_2}{\Delta t} + O_2 = \frac{2V_1}{\Delta t} - O_1 + 2\bar{I} \quad \text{con} \quad O_2 = f\left(\frac{V_2}{10^6}\right) \quad (7)$$

siendo V_1, V_2 el volumen almacenado al comienzo y al final del paso de tiempo (m^3)

Δt el intervalo de tiempo (día)

O_1, O_2 el caudal vertido al comienzo y al final del periodo ($m^3/día$)

\bar{I} el caudal medio entrante ($m^3/día$)

f un polinomio de grado inferior o igual a 5

Este último polinomio es el que en todo momento relaciona el caudal saliente en el embalse con el almacenamiento.

APLICACIÓN AL SISTEMA NERVIÓN IBAIZABAL

El análisis se abordó a paso diario para el periodo 1988-1995, al objeto establecer sus recursos globales y la gestión que se viene desarrollando en la cabecera del río Arratia entorno a la presa de Undurraga, teniendo en cuenta las diferentes estaciones hidrométricas existentes, tanto las afectadas por los vertidos de la presa de Undurraga, caso de las estaciones de Urkizu y Abusu-Lapeña, como la de Artezabal localizada en el sector central del río Ibaizabal y la de Zaratamo perteneciente a la parte baja del río Nervión. Hay que indicar que el periodo de estudio considerado de ocho años hidrológicos incluye toda una gama de posibles regímenes acaecidos en los sistemas de cuenca de los ríos Zadorra y Nervión Ibaizabal. Así mismo, incluye el periodo de acentuada sequía que tuvo lugar durante el año 1989 y principios de 1990, pero que ya empezó a manifestarse durante el otoño 1988 de modo que al inicio del invierno las reservas totales de los embalses del Zadorra estaban a tan solo el 30% de su capacidad.

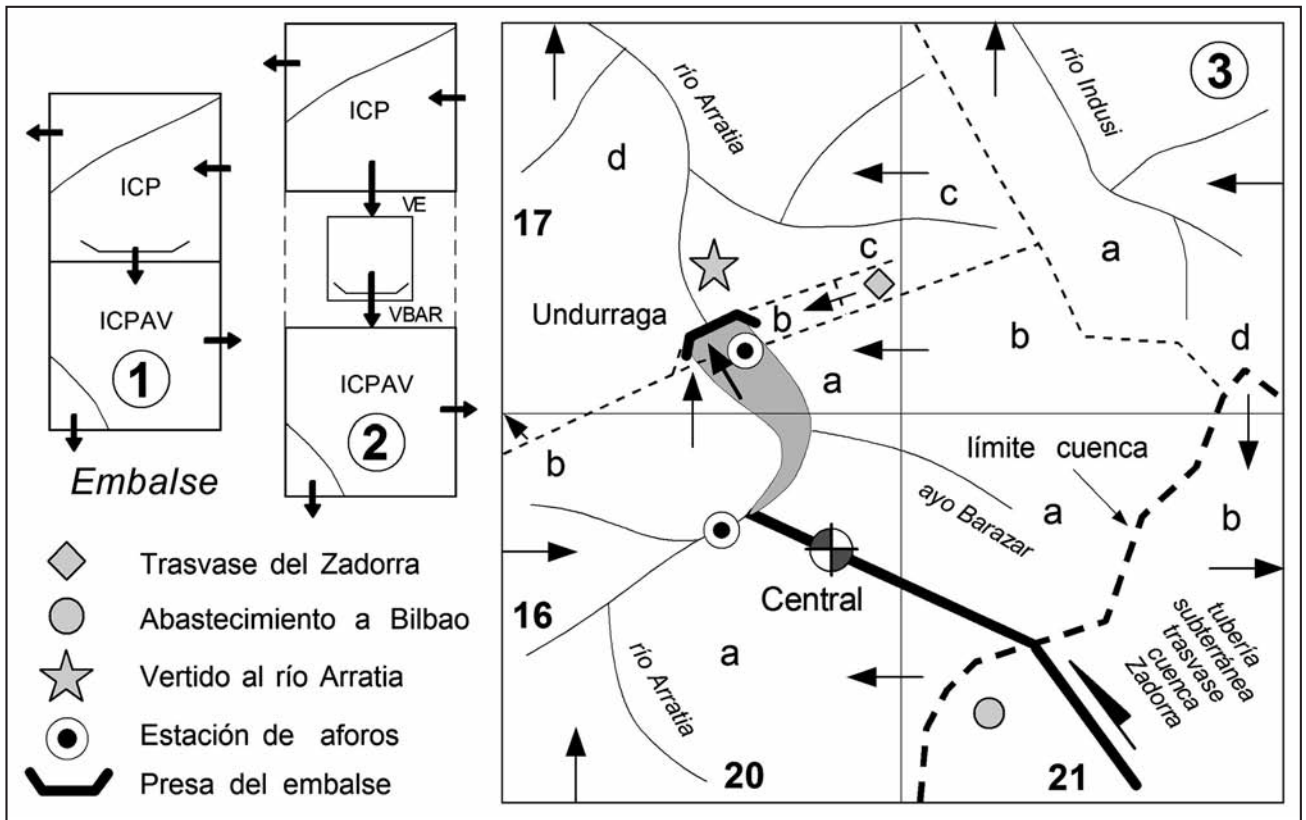


Figura 5. Esquemización de un embalse por el modelo Cequeau (1-2) y ubicación de presas reales y ficticias adoptada en torno al embalse de Undurraga para la regulación de los recursos del sistema Zadorra y de la cuenca alta del río Arratia (3).

Como ya se ha adelantado, al tratarse de un modelo distribuido, es posible incorporar de manera sectorial la información básica que incluye las características de la red de drenaje y los datos fisiográficos e hidrometeorológicos, con los que estimar para cada elemento en que se descompone la cuenca los parámetros que intervienen en el cálculo de la escorrentía. Así, considerando la superficie del sistema y la desigual topografía de las subcuencas que lo componen, se definieron 148 elementos cuadrados de 3 km de lado (Figura 6). Los datos fisiográficos se obtuvieron a partir de los mapas temáticos ya comentados que incluyen aspectos tales como la vegetación y usos del suelo, las características topográficas y geológicas y la posible presencia de humedales naturales (Figura 2).

Además, fue necesario definir el movimiento del agua en la cuenca, teniendo en cuenta las diferentes divisorias existentes y el propio trazado de los cauces, lo que permitió dar la adecuada importancia a la topografía en el proceso. De este modo, cada elemento quedó caracterizado por el código alfanumérico del elemento al que transfiere la escorrentía en él generada, estableciéndose una jerarquización de la red de drenaje, elemento por elemento, cuya esquematización para el sistema en estudio se muestra en la Figura 6.

En principio, el sistema muestra una cierta dificultad de análisis en consonancia con su elevada complejidad motivada por las diferentes transferencias que se realizan tanto hacia su interior como al exterior, que se complica aún más por la existencia de una notable variabilidad a nivel orográfico, climático

y estratigráfico, lo que se traduce al término de su parte baja por un variable déficit de escorrentía.

Por ello, para analizar adecuadamente el plan de aprovechamiento de los recursos de los embalses del sistema Zadorra y tratar de reproducir la regulación llevada a cabo en el embalse de Undurraga, fue necesario definir una presa real y su correspondiente estación hidrométrica a fin de estimar las aportaciones naturales de su respectiva cuenca vertiente de la cabecera del río Arratia. Del mismo modo hubo que establecer la existencia de tres presas ficticias correspondientes respectivamente a las operaciones de transvase hasta la presa de Undurraga, así como a los vertidos directos al cauce del río Arratia y al bombeo que se efectúa en el embalse de Undurraga con destino a la depuradora de Venta Alta para el abastecimiento a Bilbao y su comarca (Figura 5).

Las simulaciones se abordaron considerando las diferentes subcuencas, en las que existen datos de aportaciones procedentes tanto del Servicio Vasco de Meteorología como de la Diputación Foral de Bizkaia y el Consorcio de Aguas del Gran Bilbao. En la Figura 6 se especifican las direcciones de flujo en las subcuencas que componen el sistema hidrológico, así como la localización de las estaciones de control de aforos y de las estaciones meteorológicas situadas tanto en el interior como en asentamientos periféricos. En total se consideraron 5 estaciones de aforo y 1 de control de niveles, al margen de otras 37 meteorológicas, 11 de la red automática y 26 de la red manual, cuya información diaria de base fue transformada en caudal por el modelo una vez terminada la calibración.

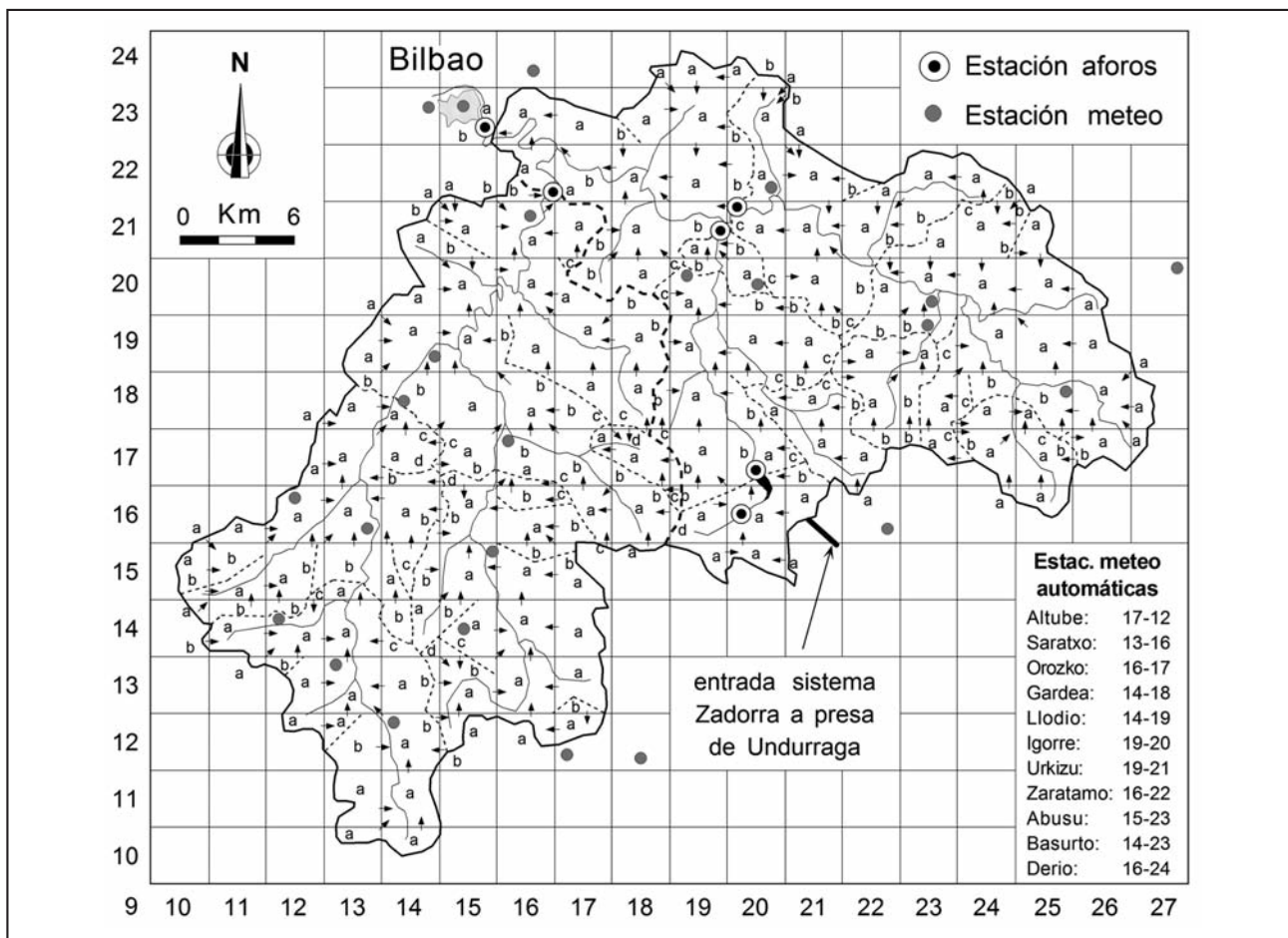


Figura 6. Esquematización del conjunto de subcuencas vertientes.

Tabla 1. Resultados de los criterios numéricos por estaciones de aforo y periodos considerados.

NTD / R	Nervión Abusu	Nervión Zaratamo	Ibaizabal Artezabal	Arratia Urkizu	Arratia Undurraga
1988	0,83 / 0,92	0,75 / 0,87	0,60 / 0,78	---- / ----	0,74 / 0,85
1989	0,73 / 0,89	0,74 / 0,86	0,58 / 0,75	---- / ----	0,76 / 0,88
1990	0,85 / 0,95	0,87 / 0,93	0,68 / 0,89	0,77 / 0,91	0,74 / 0,91
1991	0,74 / 0,90	0,82 / 0,92	0,56 / 0,74	0,87 / 0,94	0,85 / 0,94
1992	0,77 / 0,91	0,83 / 0,91	0,60 / 0,83	0,87 / 0,95	0,78 / 0,88
1983	0,91 / 0,97	0,90 / 0,95	0,61 / 0,76	0,84 / 0,92	0,79 / 0,90
1984	0,81 / 0,92	0,77 / 0,88	0,70 / 0,86	0,87 / 0,95	0,73 / 0,84
1985	0,80 / 0,91	0,86 / 0,93	---- / ----	0,85 / 0,93	0,76 / 0,92
11/90-05/91	0,78 / 0,91	0,82 / 0,91	0,63 / 0,81	0,81 / 0,94	0,81 / 0,91
Promedio	0,80 / 0,92	0,82 / 0,91	0,62 / 0,80	0,84 / 0,93	0,77 / 0,89

La calibración se efectuó mediante el programa de optimización automática, incluido en el modelo, basado en el método de Powell (*Morin y Paquet 2007*), que permite una aproximación al valor real de los parámetros maximizando o minimizando una determinada función objetivo. Finalmente, la calibración se culminó por el método de ensayo y error mediante ejecuciones sucesivas del modelo variando el valor de alguno de los parámetros. Las simulaciones en conjunto han sido muy aceptables, como se observa en la Tabla 1, en la que se consiguen por periodos y por estaciones los resultados de los dos criterios numéricos utilizados (*WMO 1992*), el NTD de Nash incluido en el modelo, y el coeficiente de correlación simple R, este último aplicado en principio a modo de comparación en las series incompletas.

Para los periodos analizados se constata por término medio un mejor ajuste en la estación de Urkizu (0,84/0,93) a pesar de ser la primeramente afectada por los vertidos, lo que corrobora la idoneidad del esquema propuesto para el tratamiento de los recursos en el sector de Undurraga (Figura 5). En orden decreciente el grado de ajuste para el resto de estaciones sería: Zaratamo (0,82/0,91), Lapeña (0,80/0,92), Arratia (0,77/0,89) y Artezabal (0,62/0,80). Los valores de Arratia y en especial de Artezabal, sin ser bajos, ponen de manifiesto el desigual control que por sectores ejercen las unidades hidrogeológicas existentes en el régimen hidráulico del sistema, siendo máximo en la cuenca del Ibaizabal a la que, como se comentó, afluye con un cierto retardo temporal buena parte de los flujos subterráneos procedentes de la unidad de Aramotz. (*Antigüedad 1986*).

Otro tanto, aunque en menor medida, sucede en la parte alta del río Arratia en relación con el funcionamiento de la unidad kárstica de Gorbeia (*Garfias y Llanos 2001*), además de las transferencias difícilmente cuantificables que se realizan en la cabecera del río Nervión hacia las cuencas de la vertiente mediterránea a través de las calizas de la unidad hidrogeológica de Subijana (*EVE 1996*). A título de ejemplo en la Figura 7, junto a los gráficos que muestran las transferencias efectuadas en el área de Undurraga durante el periodo final de la comentada sequía, se incluye las simulaciones obtenidas comprobándose que las estimaciones efectuadas por el modelo presentan en general una muy ajustada correspondencia con la información real, tanto para los caudales como en lo que se refiere a la variación de niveles.

No obstante, las variaciones de los niveles en el embalse muestran algunas desviaciones, lo que podría explicarse por modificaciones a lo largo del tiempo de la original curva de embalse desde su puesta en funcionamiento en el año 1957 (*ASZ 1958*), debido a un relleno parcial del vaso por sedimentos procedentes de la erosión de los relieves colindantes, especialmente de los que condicionan la divisoria hidrográfica principal del País Vasco desde el macizo del monte Gorbeia hasta las elevaciones más orientales existentes entre las sierras de Elgea y Aitzgorri.

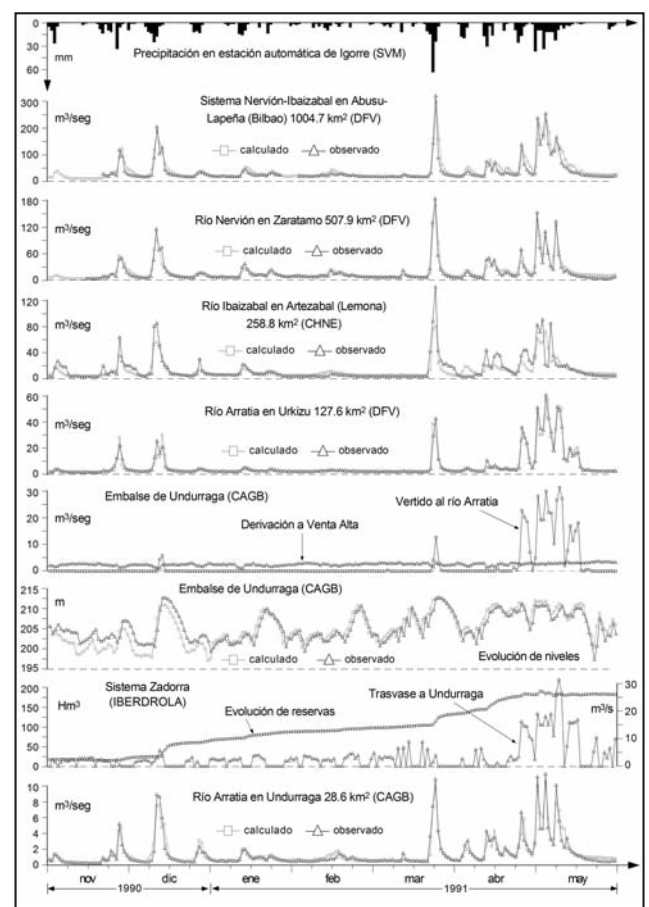


Figura 7. Resultados de la simulación diaria para el periodo final de la sequía ocurrida en el País Vasco entre los años 1989 y 1991.

Además se ha de señalar la existencia de un desfase adicional en los caudales de las estaciones derivado del proceso de fusión nival natural que, estacionalmente, tiene lugar en las cuencas, y que no queda reflejado en los registros de las estaciones automáticas debido a una incompleta instrumentalización de las mismas. Este hecho se manifiesta por una discrepancia variable entre los caudales punta observados y los calculados por el modelo, pero especialmente patente durante los primeros meses de cada año en la estación de Artezabal (Figura 7).

CONCLUSIONES

Como conclusión general a los trabajos de simulación hay que resaltar que los resultados obtenidos hasta el momento son sin ninguna duda muy alentadores, tanto más si, como ya se ha descrito, se tiene en cuenta la complejidad del sistema de cuencas investigado. En este sentido, se ha puesto de manifiesto la utilidad del modelo Cequeau, que permite estimar las variables del ciclo del agua, en cada punto concreto de una cuenca vertiente, simplificando el proceso de simulación mediante la división de la transformación lluvia-escorrentía en dos fases: la función de producción y la función de transferencia, facilitando de un modo realista el análisis de los procesos hidrológicos.

En consecuencia, son escasos los argumentos que pueden aducirse en contra de su empleo en el futuro, si acaso el elevado número de parámetros que considera y que requieren de una calibración minuciosa y de un conocimiento profundo de las condiciones fisiográficas de las cuencas, además del tiempo y el grado de laboriosidad que supone la compartimentación de la

cuencia en elementos individuales con características propias y el diseño de los flujos dentro de un esquema general de drenaje, si bien estos últimos aspectos constituyen una operación que debe efectuarse una sola vez y que, en todo caso, puede sufrir ligeras modificaciones a medida que el grado de complejidad, motivado por la creación de nuevas estructuras hidráulicas, aumenta en la cuenca.

Por todo ello, la presente aplicación se presenta como un elemento operacional extremadamente flexible a las necesidades actuales, con un amplio abanico de servidumbres en el campo de la gestión integral de recursos, pudiéndose incorporar tanto a los estudios de planificación hidráulica como a la previsión de avenidas en cuencas complejas, como el sistema Nervión Ibaizabal aquí tratado.

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio se ha desarrollado en el marco del Proyecto: UPV/EHU 001.154 EA 061-95, subvencionado por la Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea. Los autores desean expresar su agradecimiento al Profesor Guy Morin y colaboradores de la Universidad de Québec por facilitar la utilización del programa Cequeau, así como a las Diputaciones de Bizkaia y Gipuzkoa, al Centro Territorial del País Vasco del Instituto Nacional de Meteorología, al Servicio Vasco de Meteorología, a Iberdrola SA, al Consorcio de Aguas del Gran Bilbao y a la Confederación Hidrográfica del Ebro, por la cesión de la información hidrometeorológica.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

ANTIGÜEDAD, I., 1986.

Estudio hidrogeológico de la cuenca Nervión-Ibaizabal. Contribución a la investigación de los sistemas acuíferos kársticos.

Tesis Doctoral Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea, 336 pp. + anexos (inédito).

ASZ, 1958.

Obras del salto de Barazar y plan general de los aprovechamientos de las aguas del Zadorra y Bayas.

Aguas y Saltos del Zadorra SA, 26 pp. Madrid.

AYADI, M. Y M. BARGAOU, 1998.

Modélisation des écoulements de l'oued Miliane par le modèle Cequeau.

Journal des Sciences Hydrologiques, Volume 43(5): 741-757.

BÂ, K.M., DIAZ, C. Y V. RODRÍGUEZ, 2001.

Simulación de caudales de los ríos Amacuzac y San Jerónimo en el Estado de México, México.

Ingeniería Hidráulica en México, Volumen XVI-4: 117-126.

BÂ, K.M., QUENTIN, E., CARSTEANU, A., OJEDA, I., DIAZ-DELGADO, C. Y J.H., GUERRA-COBIAN, 2009.

Modelling a large watershed using the CEQUEAU model and GIS: Case of the Senegal River at Bakel.

Geophysical Research Abstracts, Volume 11, EGU2009-0.

CAGB, 1995.

Memoria del ejercicio 1994.

Consorcio Aguas del Gran Bilbao, 131 pp. Bilbao.

DGPV, 1985.

La administración del estado y las inundaciones de agosto de 1983.

Delegación del Gobierno del País Vasco, 247 pp. Madrid.

DFV, 1984.

Lluvias torrenciales agosto-1983. Cuantificación de la catástrofe.

Diputación Foral de Vizcaya, 261 pp. Bilbao.

EVE, (1996).

Mapa hidrogeológico del País Vasco.

Euskal Herriko Mapa Hidrogeologikoa. (J. Aguayo, I. Antigüedad, I. Arrate, I. Arribabalaga, A. Cimadevilla, A. Eraso, A. García de Cortázar, V. Iribar, H. Llanos, T. Morales & P. Tamés, auts.). Ente Vasco de la Energía (EVE). Eusko Jaurlaritzza Gobierno Vasco, 350 pp. + anexos. Vitoria-Gasteiz.

- GARFIAS SOLIZ, J. Y H. LLANOS ACEBO, 2001.
A model of cells as practical approach to simulate spring flow in the Itxina karstic aquifer, Basque Country, Spain.
Ground Water, Volume 39-3: 339-347.
- GOODRICH, R., 1931.
Rapid calculation of reservoir discharge.
Civil Engineering, Volume 1: 417-418.
- HEC, 1981.
Hec-1. Flood hydrograph package.
User's manual. Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers.
- ITGE, 1990.
Mapa geológico nacional a escala 1:200.000, hoja de Bilbao.
Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid.
- JORDAN, J.P. Y P. WISNER, 1983.
Description du modèle Otthymo et exemples d'application.
Ecol. Pol. Fed. Laus. IGR-172, 117 pp. Lausanne.
- LLAMAS, J., 1985.
Hydrologie générale: principes et applications.
Gaëtan Morin. Québec.
- LLANOS, H., BÀ, K.M. Y A. CANALEJO, 1999.
Modelación hidrológica de la cuenca alta del río Ega (País Vasco y Navarra).
Ingeniería del Agua, Volumen 6(3): 241-250.
- MAPA, 1987.
Mapa de cultivos y aprovechamientos del País Vasco.
Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Dirección General de Producción Agraria. Madrid.
- MORIN, G., FORTIN, J.P., LARDEAU, J.P., SOCHANSKI, W. Y S. PAQUETTE, 1981.
Modèle CEQUEAU, manuel d'utilisation.
INRS-Eau, Ste-Foy. Québec.
- MORIN, G., FORTIN, J.P. Y W. SOCHANSKI, 1982.
Simulation des débits du ruisseau des Eaux Volées et de sous-bassins.
Rapport:152 rédigé pour Environnement Canada, 63 pp. Québec.
- MORIN, G. Y P. PAQUET, 2007.
Modèle hydrologique Cequeau.
INRS-ETE, rapport de recherche: R000926, 458 pp. Québec.
- QUINN, P., BEVEN, K.J. Y R. LAMB, 1995.
The $\ln(a/\tan\beta)$ index: how to calculate it and how to use it within the Topmodel framework.
Hydrol. Processes, Volume 9: 161-182.
- THORNTHWAITE, C.W. Y J.R. MATHER, 1957.
Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance.
Climatology, Volume 10-3. Centerton N.J.
- UNESCO, 1995.
El programa hidrológico internacional de la Unesco en América Latina y el Caribe.
Pub. Unesco. París.
- USACE, 1991.
Model streamflow synthesis and reservoir regulation SSARR.
US. Army Corps of Engineers North Pacific Division. Oregon.
- WMO, 1992.
Simulated real-time intercomparison of hydrological models.
Geneva Switzerland Operational Hydrology WMO n°-779.

