

Aplicación de modelos hidrológicos determinísticos al análisis de crecidas en la cuenca del río Ayuda (provincia de Álava - País Vasco)

HILARIO LLANOS ACEBO (*)
JAIME GÁRFIAS SOLIZ (**)
KHALIDOU MAMADOU BÂ (**)
IÑAKI ANTIGÜEDAD AUZMENDI (***)
JOSÉ LLAMAS SIENDONES (****)

RESUMEN Actualmente, la previsión de crecidas se ha convertido en un tema de interés prioritario en el País Vasco, debido a las inundaciones producidas que, con una cierta frecuencia, se han venido observando en los últimos tiempos. En este sentido la aplicación de algunos métodos de modelización (HEC-1 y OTTHYMO) ha resultado ser francamente interesante. Si bien el objetivo final del estudio contempla la totalidad de las cuencas del País Vasco, en una primera fase se ha centrado la atención en la cuenca del Río Ayuda, cuyas características climáticas y regímenes hidráulicos pueden considerarse como representativos del conjunto del País Vasco. Para efectuar una comparación de los modelos utilizados han sido elegidas 11 crecidas de las 21 para las cuales se dispone de datos en el Río Ayuda. La comparación ha puesto en evidencia, en lo que concierne a la región, ciertas diferencias de estructura y campo de aplicación, aunque dentro de unos resultados satisfactorios.

APPLICATION OF DETERMINISTIC HYDROLOGICAL MODELS TO THE FLOOD ANALYSIS IN THE AYUDA RIVER BASIN (ALAVA PROVINCE-BASQUE COUNTRY)

ABSTRACT Currently, flood forecasting has become a topic of high-priority interest in the Basque Country, due to the damages that, with a certain frequency, have been produced in the last times. In this sense the application of some models (HEC-1 and OTTHYMO) has turned out to be very interesting. Although the final objective of the study envisages the whole the basins of the Basque Country, in a first phase the attention has been pointed out in the Ayuda River, whose climatic and hydraulic characteristics can be considered as representative of the Basque Country. A comparison of the used models has been made by choosing 11 floods of 21 for which data were available in the Ayuda River. Certain differences of structure and field of application have been put in evidence, concerning the region, though within the satisfactory results.

Palabras clave: País Vasco; Modelos hidrológicos; Hec-1; Otthymo; Análisis de crecidas; Caudales máximos; Prevención de avenidas.

1. INTRODUCCIÓN

Los esfuerzos para presentar matemáticamente los procesos hidrológicos datan de hace muchos años; sin embargo,

es sólo en los últimos decenios que los modelos hidrológicos se han convertido suficientemente claros y ampliamente disponibles para ser considerados como medios operacionales. Estos modelos son actualmente utilizados con diversos objetivos, definiendo cada uno de ellos sus propias necesidades. En consecuencia, se han desarrollado toda una serie de modelos deterministas, donde se observan diferencias en la estructura de base, en los procesos que estos simulan y en la manera cómo se produce esta simulación. La mayor parte de los modelos hidrológicos son únicamente utilizados en investigaciones, pero muchos han sido introducidos en la práctica en materia de hidrología operacional. Sin embargo, a pesar de la gran cantidad de modelos desarrollados, aún existen ciertas lagunas en

(*) Catedrático de Geodinámica de E.U. Doctor en Ciencias Geológicas. Universidad del País Vasco. Facultad de Ciencias de Lejona.

(**) Profesor de Investigación del Centro Interamericano de Recursos del Agua. Doctor Ingeniero Civil. Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ingeniería.

(***) Profesor Titular de Geodinámica. Doctor en Ciencias Geológicas. Universidad del País Vasco. Facultad de Ciencias de Lejona.

(****) Catedrático de Hidrología. Doctor Ingeniero Civil. Université Laval. Faculté des Sciences et Génie.

tre la teoría y la práctica, esto es, entre los modelos y su aplicación real.

La simulación de procesos hidrológicos a partir de modelos matemáticos, tales como el modelo OTTHYMO (Jordan et Wisner, 1983) y el modelo HEC-1 (U.S. Army Corps of Engineers, 1981), pueden permitir simular el comportamiento hidrológico, si éstos han sido propiamente calibrados de manera que permitan una gestión eficaz de los recursos hídricos. Para evaluar la eficiencia de estos modelos, una serie de criterios han sido propuestos por el comité de la ASCE (Task Committee on Evaluation Criteria, 1991). Para el análisis de eventos simples, los criterios están basados en el grado de similitud existente entre los hidrogramas observados y los hidrogramas simulados; tales criterios consideran: la relación de caudales pico, los volúmenes de los hidrogramas y los residuos de la suma de cuadrados. Por ejemplo, varias investigaciones (Ibbitt and O'Donnell, 1971; Johnston and Pilgrim, 1976; Duan et al., 1992) han utilizado la suma de

cuadrados de las diferencias entre los hidrogramas simulados y observados, mientras otras investigaciones (Liong et al., 1991) han considerado los caudales pico y los volúmenes del hidrograma.

De otra parte, existe una gran variedad de métodos desarrollados para calibrar los modelos matemáticos o conceptuales. Estos incluyen procedimientos automáticos sofisticados (Gupta and Sorooshian, 1985; Duan et al., 1992; Garfias, 1994), métodos basados en sistemas expertos (Bafant and Delleur, 1988; Liang et al., 1991) y métodos heurísticos basados en medidas de sensibilidad estimadas (Jewell et al., 1978; Mein and Brown, 1978). Estos procedimientos automáticos requieren rutinas de optimización que deben ser integradas a los modelos. Una atención considerable ha sido dirigida al análisis y aplicación de las diferentes rutinas (Ibbitt and O'Donnell, 1971; Johnston and Pilgrim, 1976; Wang, 1991) y al desarrollo de nuevas técnicas de optimización (Duan et al., 1992).

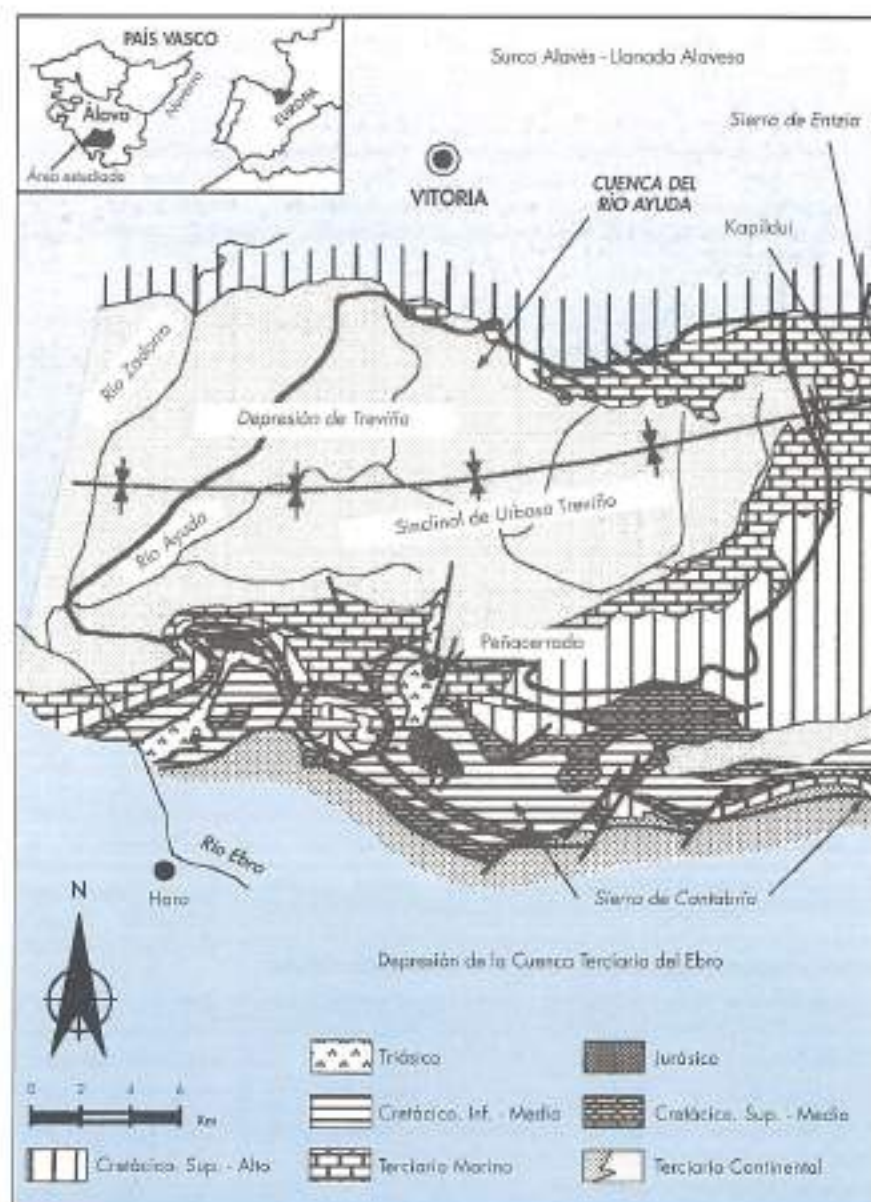


FIGURA 1. Localización y estrato geológico de la cuenca del Río Ayuda.

A pesar de los avances en esta materia, la estimación de los parámetros de los modelos hidrológicos se constituye en una tarea difícil. Además, los datos utilizados de los diferentes procesos hidrológicos normalmente están afectados de ruidos que pueden provocar desviaciones en las estimaciones. Dadas estas consideraciones, este artículo presenta la modelación de crecidas, con el objeto de comparar las ventajas y las limitaciones de dos modelos hidrológicos, el modelo OTTHYMO (Jordan et Wisner, 1983) y el modelo HEC-1 (U.S. Army Corps of Engineers, 1981). Este análisis se basa en las características particulares de concepción de cada modelo, tomando como región de estudio la cuenca del Río Ayuda ubicada en el País Vasco (Estado Español).

2. PRESENTACIÓN DEL ÁREA ESTUDIADA

La cuenca del Río Ayuda, situada en el sector centro-meridional de la Provincia de Alava, si bien por cuestiones histórico-administrativas una parte pertenece a la vecina Provincia de Burgos, es tributaria del sistema Zadorra. Posee una superficie de 340 Km² y se prolonga en dirección Oeste (figura 1) desde las estribaciones de la Sierra de Entzia (Monte Kapildui) hasta su confluencia con el Río Zadorra en las inmediaciones de Berantevilla, estando sus bordes definidos por los llamados Montes de Vitoria, al Norte y por los relieves de Belabia y Peñacorrada, al Sur.

Pese a que su poblamiento es bajo y disperso, desde el punto de vista hidrológico presenta, no obstante, un gran interés estratégico habida cuenta de su especial ubicación y relativa proximidad a zonas, como la Llanada Alavesa, en torno a la capital Vitoria-Gasteiz, que desde el punto de vista socioeconómico se han caracterizado en los últimos años por un importante aumento en sus actividades agrícolas e industriales. Por todo ello, parece más que justificable avanzar en el conocimiento de sus recursos hídricos globales y especialmente, como es el caso de las avenidas, en el comportamiento hidrodinámico bajo condiciones extremas, para su adecuada planificación y correcta gestión.

Desde el punto de vista geológico (figura 1) la cuenca se incluye en su totalidad entre el denominado Surco Alavés y la Depresión Terciaria del Ebro. En general, no presenta una excesiva complejidad estructural si se exceptúa su sector meridional. En efecto, destaca una amplia estructura sinclinal (Unidad de Entzia-Treviño), de dirección Este-Oeste y suave configuración, con algunas estructuras internas de detalle, si bien por el Sur, y como prolongación de la anterior, aparece una banda rectilínea, intensamente plegada, conocida como Unidad de la Sierra de Cantabria, testimonio de una tectónica tangencial merced a la cual todo el conjunto se desplazó sobre los sedimentos de la Depresión Terciaria del Ebro, según una traslación de vergencia sur (Llanos, 1992; Abalos y Llanos, 1994).

Litológicamente la Unidad de Entzia-Treviño está constituida por una serie de materiales finicretácicos y terciarios de distinta naturaleza (calizas, conglomerados, dolomías, areniscas y arcillas) y desigual distribución espacial, dando lugar a la existencia de dos unidades hidrogeológicas bien definidas en cuanto a diferencias de permeabilidad se refiere. La primera, de carácter libre y altamente karstificada, constituida por los materiales carbonatados de edad Paleoceno (Terciario marino), de naturaleza alternante y carácter semipermeable, que ocupan la casi totalidad de la misma. En consecuencia, el resultado final de esta estructuración es la aparición de dos bandas de afloramientos de similares características, que en buena parte sirven de divisoria natural de la cuenca, convergentes hacia la cabecera de la misma y

conectadas hidráulicamente en profundidad, dando lugar a la existencia de condiciones de artesianismo en toda su depresión interna.

3. LOS MODELOS

Entre la gran diversidad de modelos disponibles, esta investigación se ha limitado al análisis de dos modelos: el modelo OTTHYMO (Jordan et Wisner, 1983) y el modelo HEC-1 (U.S. Army Corps of Engineers, 1981), los cuales tienen diferencias de estructura y modo de aplicación. El primero está basado en el modelo de Nash (OTTHYMO) y se caracteriza por su simplicidad; en cambio el segundo (HEC-1), basado en la teoría del hidrograma unitario sintético, se caracteriza por poseer una estructura con múltiples opciones que hace posible su utilización en una gama muy variada de aplicaciones. Es importante hacer notar que para fines de comparación de técnicas de calibración, se ha optado por calibrar el primer modelo (OTTHYMO) por el método de ensayos y errores, en cambio en el segundo modelo (HEC-1) se hace uso del algoritmo de optimización, adjunto al modelo (Ford et al, 1980).

Dentro de las diferentes opciones de simulación de hidrogramas que ofrece el modelo OTTHYMO, la más simple considera la hipótesis de que la cuenca se comporta como un embalse con respuesta lineal, donde el almacenamiento S es directamente proporcional al caudal de salida Q ($S = KQ$). Tal modelo es función solamente del parámetro K , que corresponde al coeficiente de almacenamiento lineal. La simulación de hidrogramas, en el caso de cuencas de tipo rural, como la del Ayuda y la mayoría de las existencias en el País Vasco, se realiza utilizando el procedimiento modificado del SCS (Soil Conservation Service, 1972) para calcular las pérdidas (y , por tanto, la precipitación efectiva), y el modelo de Nash (1957) para calcular el hidrograma unitario instantáneo (HUI).

Dos parámetros deben ser estimados para obtener el HUI. En primer término, el número de embalses n , y, en segundo término, el tiempo al pico t_p del hidrograma. Si n puede ser determinado, entonces sólo resta por definir el parámetro t_p (tiempo al pico). A partir de un número límite de simulaciones sobre pequeñas cuencas el valor aproximado de n es igual a 3 (Jordan y Wisner, 1983). Los valores de t_p pueden ser obtenidos en tablas, en función de las condiciones de la región, o bien, como en nuestro caso, mediante la definición de la red de isocronas diseñada a partir de la formulación propuesta por Instituto Bávoro de Hidrología (Llanos, 1985), así como del análisis de los propios hidrogramas observados.

Por otra parte, para el cálculo de las pérdidas totales (establecimiento del parámetro CN) y, en consecuencia, para la determinación de la precipitación efectiva, se ha utilizado, como ya se ha indicado, el procedimiento modificado del SCS. Este procedimiento expresa la transformación de la precipitación en volumen de agua generado mediante la siguiente ecuación:

$$Q = (P - I_a)^2 / (P - I_a + S) \quad (1)$$

donde Q es el volumen de agua generado, P el volumen de agua precipitado, S la retención máxima en la cuenca e I_a las pérdidas iniciales. La diferencia entre el volumen de agua precipitado (P) y el generado como escurrimiento inmediato (Q) representa las pérdidas totales. Estas incluyen las pérdidas iniciales (I_a) y las debidas a retenciones en la cuenca (S). S se relaciona con el parámetro CN (número de

curva de escurrentía del SCS, definida de acuerdo con el tipo de suelo) de la siguiente forma:

$$CN = 25,400 / (254 + S) \quad [2]$$

El procedimiento del SCS, considera que las pérdidas iniciales (I_a) son iguales al 20% de las pérdidas por retención (S). Sin embargo, esta hipótesis conduce a menudo a resultados erróneos, principalmente para eventos de corta duración y alta frecuencia, lo que provoca volúmenes calculados generalmente muy por debajo de los observados.

Estudios más recientes (Jobin, 1982) han mostrado que los resultados son más satisfactorios si las pérdidas iniciales están basadas en la observación. Por ello, se ha propuesto utilizar el índice de precipitación antecedente (IPA). Este índice establece el grado de humedad de una cuenca en un momento dado, de acuerdo con la expresión propuesta por Jaton et al. (1978):

$$IPA_i = C \cdot IPA_{i-1} + P_{i-1} \quad [3]$$

donde IPA_i es el índice de saturación del día i , IPA_{i-1} el índice de saturación del día $i-1$, P_{i-1} la precipitación del día $i-1$, y C un coeficiente. Es importante señalar que la ecuación anterior es de tipo recursivo, de modo que para la estimación del IPA de un día i cualquiera, se debe conocer la precipitación y el IPA del día anterior (Bá et al., 1991). Por ello, para su establecimiento se ha de disponer de series continuas y el cálculo deberá iniciarse al comienzo de un periodo estacional en el que la humedad es prácticamente nula ($IPA = 0$). A modo de ejemplo, en la figura 2 se muestra la variación del IPA a lo largo de los meses de noviembre y diciembre de 1982, periodo de tiempo en el que se registraron cuatro importantes crecidas en la cuenca del Río Ayuda.

Una vez conocido el IPA se adopta el procedimiento propuesto por diversos autores (Jobin, 1982; Jordan y Wisner, 1983; Consuegra-Zammit, 1987; Bá et al., 1991) por el que se relacionan los registros de caudales con las precipitaciones para saber si un determinado evento lluvioso ha engen-

drado, o no, un aumento significativo de la escurrentía. En la figura 3 se han representado los distintos eventos observados a lo largo del periodo 1982-87 en la cuenca del Río Ayuda, diferenciándose unos de otros de tal modo que es posible definir entre ellos una curva de separación que representa el umbral de escurrentía. Quiere esto decir que, para un determinado estado de humedad antecedente en la cuenca, podemos fijar un valor que representa la altura mínima de lluvia que debe precipitarse para que se produzca un aumento del caudal.

Este valor es, de hecho, igual a las pérdidas iniciales (I_a) y, en nuestro caso, ha sido establecido por término medio en 8 mm, si bien, para condiciones con valores de IPA elevados, puede disminuir hasta 7 mm. En la ecuación [1], una vez fijadas las pérdidas iniciales, sólo queda por determinar las pérdidas por retención (S), y a partir de aquí el parámetro CN en la ecuación [2], obteniéndose finalmente la lluvia neta o precipitación efectiva por el procedimiento del SCS. Así mismo, hay que señalar que para la calibración del modelo OTTHYMO es necesario efectuar previamente la descomposición del hidrograma observado a fin de eliminar la contribución subterránea de la escurrentía, ya que el modelo sólo trabaja con el hidrograma residual.

A diferencia del modelo OTTHYMO, el modelo HEC-1 (Hydrologic Engineering Center, 1981) tiene una mayor complejidad estructural con diferentes opciones de cálculo para un mismo objetivo. Por ejemplo, para la estimación del hidrograma unitario el modelo dispone de tres opciones, en cada una de las cuales es necesario especificar una serie de parámetros iniciales, aunque dado el caso de que éstos no existieran, el modelo los genera a partir de un número determinado de iteraciones.

Dependiendo del método a emplear es necesario especificar una serie de parámetros. El método de Clark (1945) requiere tres parámetros: el tiempo de concentración de la cuenca T_C , el coeficiente de almacenamiento R , y una curva superficie-tiempo. En cambio, para la opción del método del Hidrograma Sintético de Snyder (1938), los parámetros requeridos son definidos a partir del método de

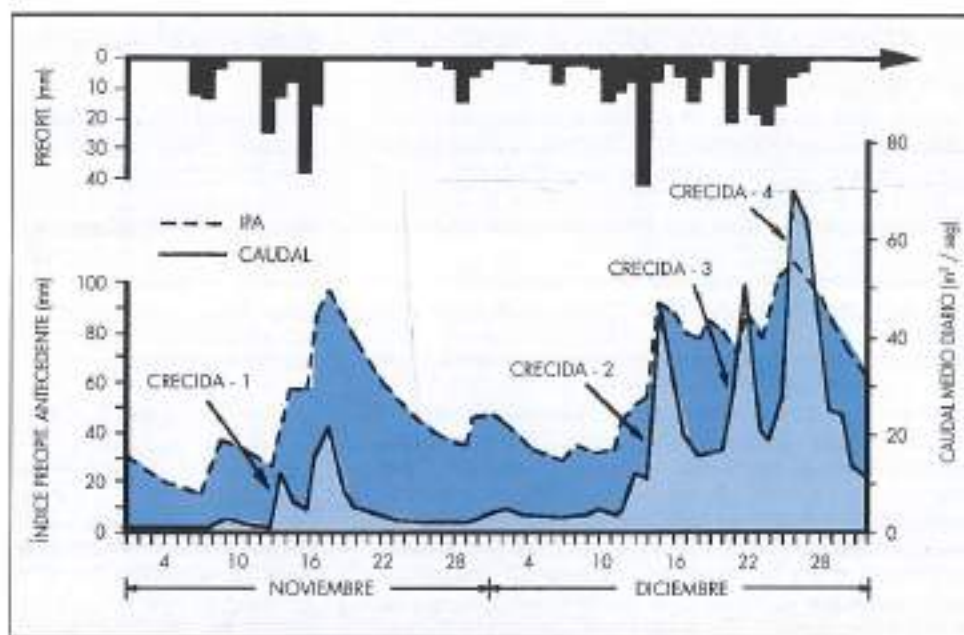


FIGURA 2. Evolución de los caudales y del IPA (noviembre y diciembre de 1982).

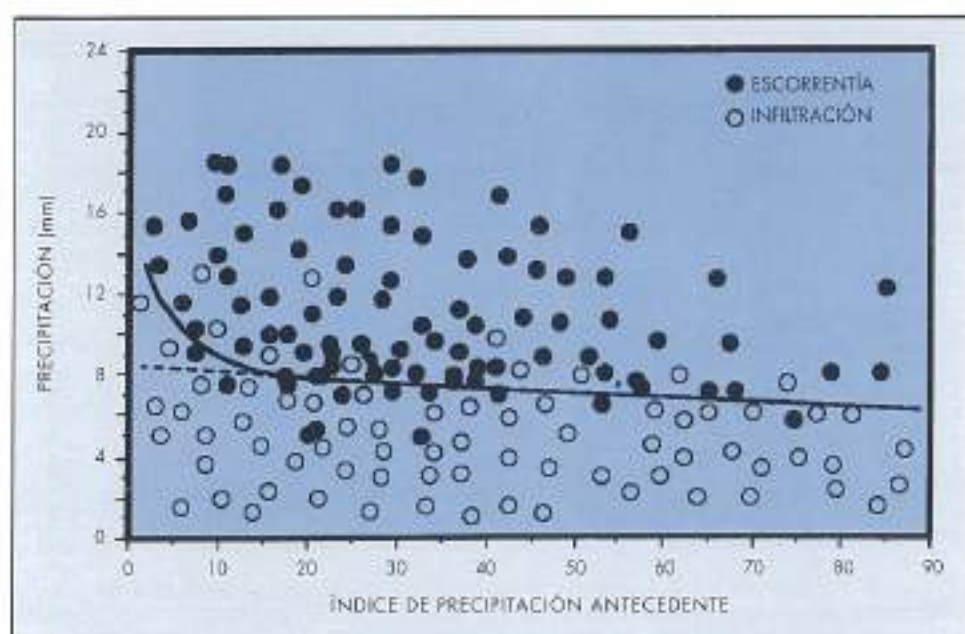


FIGURA 3. Establecimiento del umbral de escorrentía.

Clark. El método de Soil Conservation Service, (SCS, 1972), requiere un simple parámetro, TLAG, que es igual al intervalo de tiempo Lag (en horas) entre el centro de masa del histograma de precipitación y el pico del hidrograma unitario.

Dos detalles deben ser considerados en el modelo con relación a las pérdidas. Primero, la precipitación que no contribuye a un aumento de la escorrentía es considerada como una pérdida en el sistema. Segundo, las ecuaciones utilizadas para calcular las pérdidas no consideran la humedad antecedente del suelo, o el almacenamiento que se produce a lo largo del escurrimiento. Estos son elementos que disminuyen la capacidad del modelo HEC-1, sin embargo, es evidente que la definición de la precipitación neta constituye actualmente uno de los factores de mayor incertidumbre dentro de la modelación.

A diferencia del modelo OTTHYMO, el modelo HEC-1 permite considerar el hidrograma en su totalidad, ya que el mismo modelo realiza la separación de la componente de escorrentía subterránea (en representación logarítmica de caudales), para lo cual utiliza la siguiente expresión:

$$Q = Q_0 [RTIOR]^{-\alpha} \quad [4]$$

donde Q es el caudal correspondiente a la aportación subterránea en un momento dado, Q_0 representa el caudal al comienzo del agotamiento, RTIOR se define a partir de la pendiente de la recta de agotamiento, y $\alpha \Delta t$ es el tiempo en horas una vez que la recesión ha dado comienzo.

La mejor reconstitución de un hidrograma es aquella que minimiza la función objetivo. Esta función incorporada en el modelo corresponde a la raíz cuadrada de la suma de las diferencias al cuadrado entre los hidrogramas observados y los hidrogramas calculados. Esta diferencia será un mínimo para una estimación óptima de los parámetros del modelo. El mínimo de la función objetivo se obtiene en base al método univariable de Ford et al. (1980). Este procedimiento va calculando sistemáticamente varios valores de la función objetivo, alternándolos hasta obtener un mínimo de la misma. No obstante,

el procedimiento de optimización no garantiza un óptimo "global" ya que el método sólo permite obtener un mínimo local.

4. LA CONCEPTUALIZACIÓN DEL SISTEMA

A fin de establecer un lazo entre las características físicas e hidrometeorológicas y los modelos, un esquema de conceptualización ha sido adoptado. Este esquema permite estructurar el sistema de manera que permita integrar las diferentes características hidrológicas a la estructura modular establecida para cada modelo. Para este fin, una vez definidos los límites de la cuenca en estudio (342 km² de superficie), ésta ha sido considerada globalmente dentro de la estructura de modelación. Esta decisión ha sido adoptada, en vista de la falta de estaciones de aforo intermedias que, de existir, sin duda podrían mejorar el proceso de simulación.

Por consiguiente, se ha considerado una única estación de aforo, en la confluencia del Río Ayuda con el Río Zadorra, así como un total de 12 estaciones pluviométricas para el análisis de precipitación. La información hidrométrica y pluviométrica proviene de diferentes organismos (Servicio Meteorológico Nacional, Iberduero, S.A., Gobierno Vasco, Diputación Foral de Álava, Base Militar de Agoncillo) y el periodo de estudio considerado se extiende de 1982 a 1987, el cual ha sido fijado en razón de la disponibilidad y la fiabilidad de la información existente.

5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

De acuerdo con todas las consideraciones precedentes se ha procedido a la simulación, por uno y otro modelo, de 11 de las crecidas inventariadas. En todos los casos la cuenca ha sido considerada como de tipo rural y la simulación, sin discretización, esto es generando un sólo hidrograma resultante, se ha resumido a definir las variables de los diferentes comandos integrantes de las funciones de producción y transferencia de ambos modelos.

Los resultados del presente estudio se muestran en la figura 4, pudiéndose constatar que a excepción de la crecida 4, en la que la evolución de los caudales observados corres-

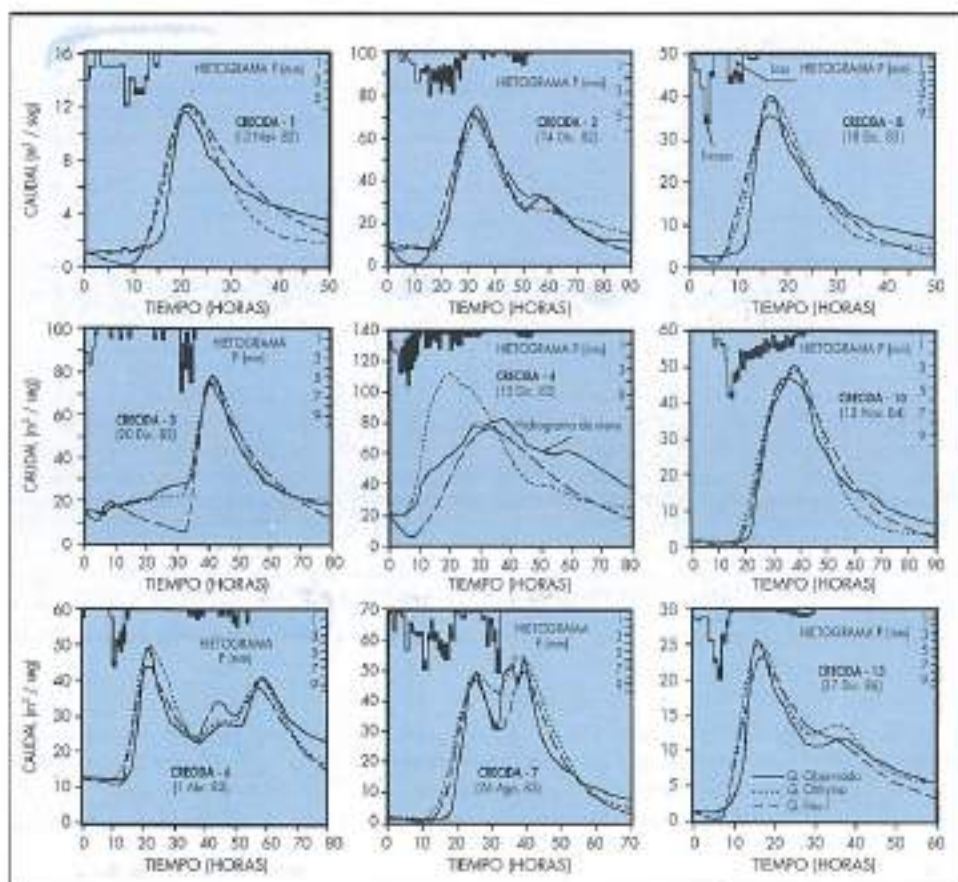


FIGURA 4. Hidrogramas obtenidos para las crecidas investigadas.

ponde a un hidrograma combinado de lluvia y nieve, en la mayoría de los casos los modelos se ajustan adecuadamente a las condiciones fisiográficas de la cuenca, reproduciendo con suficiente aproximación los hidrogramas observados, hasta el punto de que el caudal máximo computado en ningún caso, salvo el ya mencionado, se separa más del 3% del caudal pico observado. Este último extremo se hace más evidente, si cabe, si nos atenemos a los resultados de los análisis de regresión (figura 5), en el que se relacionan los valores de los caudales máximos calculados y observados, que muestran, para ambos modelos, una más que aceptable convergencia numérica, como se pone de manifiesto por sus elevados coeficientes de correlación encontrados ($r > 0.987$).

Existe no obstante algún hecho que conviene puntualizar, principalmente en lo referente al cálculo de las pérdidas iniciales por el modelo HEC-1 que incide, de forma directa, en la estimación de los caudales punta, y que si bien en el presente estudio no interviene de manera decisoria, dado el carácter moderadamente permeable de los materiales presentes en la cuenca, sí presenta una mayor implicación en cuencas anexas, situadas inmediatamente al Sur, como las de los ríos Inglares y Ega, caracterizadas por una elevada tasa de infiltración motivada por su constitución litológica, fundamentalmente carbonatada. Bajo esas peculiares condiciones (Llanos, 1992) el modelo muestra, en general, una evolución de los caudales en fase de agotamiento totalmente anómala y una sobreestimación en el pico de la crecida, por lo que para ese tipo de cuencas, dotadas de un notable "efecto de filtrado", es aconsejable la utilización del modelo OTTHYMO.

Por otra parte la aplicación del modelo OTTHYMO presenta una notable ventaja ya que permite definir unas rela-

ciones estables entre el CN² y las condiciones de humedad antecedente (IPA), siendo el CN² el CN calibrado para una infiltración inicial predeterminada. En la figura 6 se muestra la curva obtenida para el Río Ayuda, la cual corresponde a un ajuste de tipo polinomial. La obtención de este tipo de curvas es esencial para poder efectuar la simulación de otros eventos meteorológicos particularmente de aquellos que deban de tenerse en cuenta en los trabajos de planificación y prevención.

A modo de conclusión debe indicarse que los resultados obtenidos son, en general, alentadores e indican que la aplicación en la cuenca del Río Ayuda de los modelos descritos permite simular de manera bastante adecuada sus crecidas. Los caudales simulados presentan una excelente precisión en lo referente a la magnitud de los picos, y en general, en ambos modelos el tramo ascendente de la crecida calculada es similar, comenzando ligeramente antes que en la crecida observada y presentando además una menor pendiente.

En el tramo descendente del hidrograma es donde las diferencias entre los modelos y de éstos con el hidrograma observado son más notorias. En la parte inicial del tramo las decrecidas calculadas se retrasan, por lo general, respecto a la observada, mientras que en la parte final, correspondiente al agotamiento, las decrecidas calculadas claramente subestiman los caudales observados, de forma más evidente en el HEC-1. Este hecho es también observable en el agotamiento inicial, previo a la crecida. Esto indica que ambos modelos subestiman la importancia del caudal de base al final de la decrecida, y que se ajusta mejor a la realidad la separación de la componente subterránea realizada previamente por el usuario para el modelo OTTHYMO que la separación que realiza el propio modelo HEC-1. En cualquier caso estos aspec-

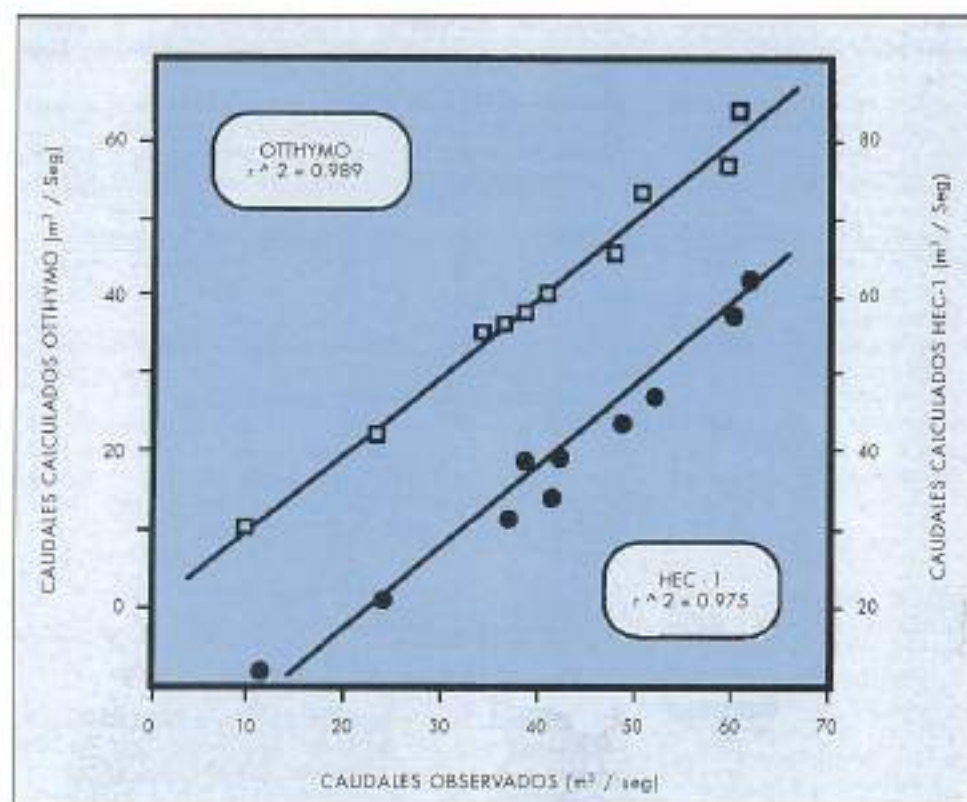


FIGURA 5. Comparación de resultados.

tos deben tener mayor implicación en cuencas con mayor participación del caudal de base en el hidrograma.

Otra diferencia entre estos modelos es que el HEC-1 tiene disponible una subrutina de optimización. Este as-

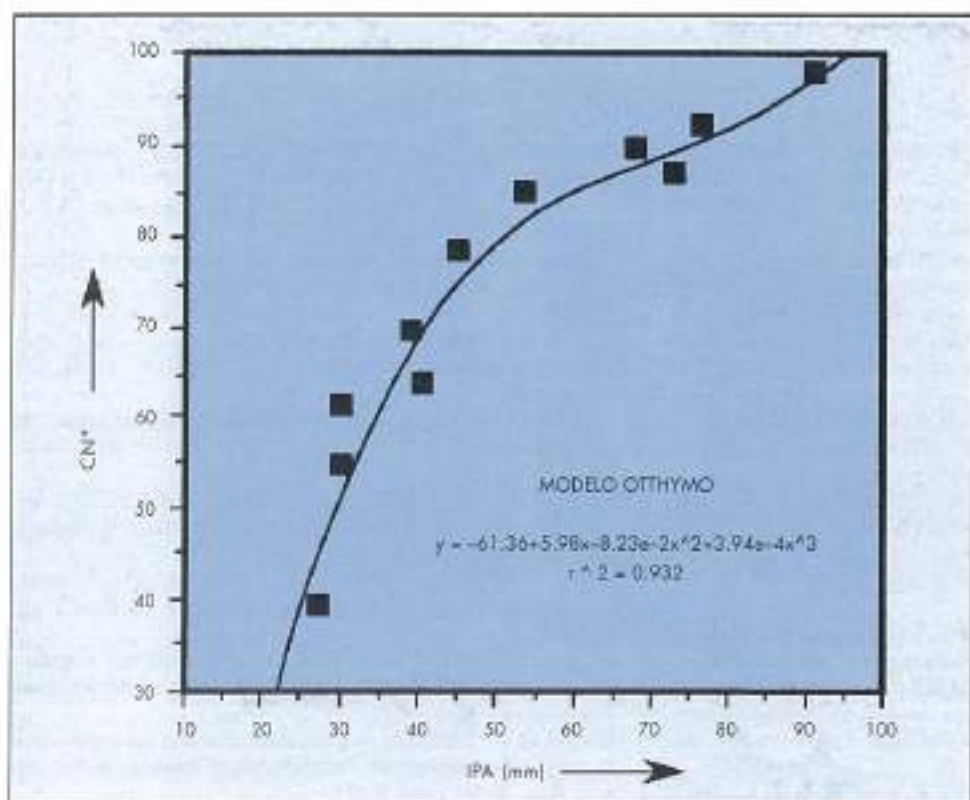


FIGURA 6. Relación CN* - IPA.

pecto se hace evidente en la crecida 4 donde las precipitaciones registradas deben considerarse como una combinación de lluvia y nieve. Como puede verse, esta crecida permite establecer, por un lado, la no aplicabilidad del modelo OTTHYMO para condiciones de precipitación en forma de nieve y, por otro lado, con respecto al modelo HEC-1, la importancia de obtener un óptimo global considerando las condiciones generales que generan la crecida.

En el caso de crecidas provocadas por aguaceros sucesivos de gran intensidad (crecidas 6 y 7) los dos modelos se ajustan relativamente bien, sobre todo si se considera la magnitud de los picos, existiendo ciertas diferencias en el tramo comprendido entre ellos que influyen en el volumen de agua representado por los hidrogramas. En síntesis, puede afirmarse que a pesar de la estructura simple del modelo OTTHYMO, éste se ajusta mejor a las condiciones de la región aquí considerada; en cambio, el modelo HEC-1, a pesar de su complejidad y gran poder de resolución, subestima los resultados.

6. AGRADECIMIENTOS

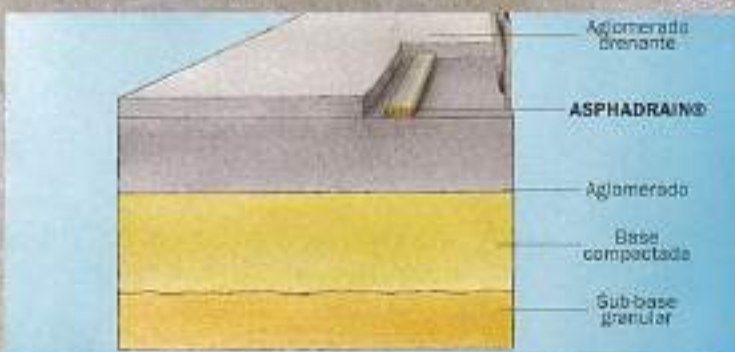
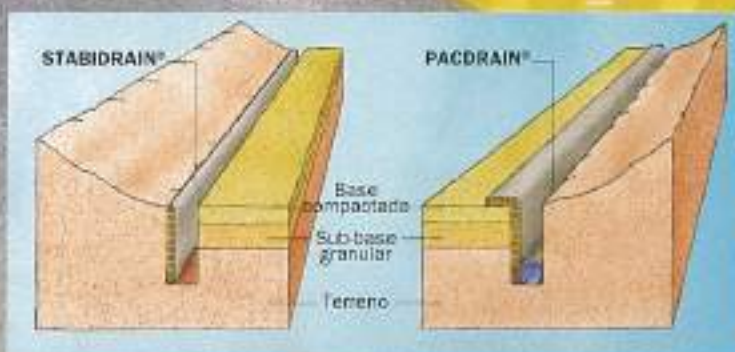
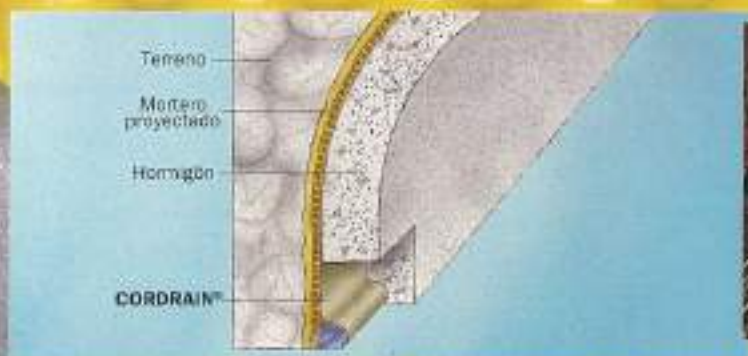
Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo de los siguientes organismos: Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et Génie de Canada (subvención A8540), Universidad del País Vasco (Proyecto de investigación 121 310-9/88 y Programa de Formación del Profesorado) y Organización del Tratado del Atlántico Norte (NATO proyecto de investigación CRG 900 431). Así mismo, por su desinteresada colaboración, poniendo a nuestro alcance diversa información de índole hidrometeorológica, los autores desean expresar su más vivo agradecimiento a los componentes del Servicio Vasco de Meteorología, don José Antonio Aranda y don Rubén García de Andoin, al Centro Meteorológico Zonal del Golfo de Bizkaia del Servicio Nacional de Meteorología en Igeldo, señor don Carlos García de Salazar, a don Clemente Prieto y colaboradores del Servicio de Hidrología de Iberrola, S.A., y a la Confederación Hidrográfica del Ebro, en las personas de don César Ferrer y don Víctor Arqué.

7. BIBLIOGRAFÍA

- ÁBALOS, B. y LLANOS, H., 1994. *Estructura of the "Sierra de Cantabria" (Southern Pyrenean Frontal Thrust, Basque Country, Spain): a new perspective from section balancing*. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 319, série II, p. 475-481.
- ASCE, 1990. *Task Committee on Evaluation Criteria for Watershed Models, Watershed planning and analysis in action*. In Proceedings of the Symposium on Watershed Management of the Irrigation and Drainage. Ed. by R.E. Higgins, R. Singh and P.A. Rechard, American Society of Civil Engineers, New York.
- BÁ, K. M.; LLAMAS, J. y LAGACÉ, R., 1993. *Funciones de producción de algunas cuencas saharianas*. Ingeniería Hidráulica en México, (vol. III, n° 2-3, p.p. 53-57).
- BAFFAUT, C. y DELLEUR, J. W., 1989. *Expert system for calibrating SWMM*. J. Water Resour. Plann. Manage. Div. Am. Soc. Civ. Eng., 115 (3), 278-298.
- CHOW, V. T., 1964. *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York.
- CONSUEGRA-ZAMMIT, D., 1987. *Vérification du modèle hydrologique OTTHYMO et propositions pour son application*. Thèse Msc, Université d'Ottawa, 273 p. + anexes.
- CLARK, C. O., 1945. *Storage and the unit hydrograph*. Transactions of the American Society of Civil Engineers 110, pp. 1419-1446.
- DICKINSON, W.; HOLLAND, M. E. y SMITH, G. L., 1967.

- An experimental rainfall-runoff facility*, No. 25, 25, Hydrology Papers, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- DOOGE, J. C., 1973. *Linear theory of hydrologic systems*. Tech. Bull. No 1468, Agri. Res. Ser., US. Dep. Agric.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S. y GUPTA, V., 1992. *Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models*. Water Resour. Res., 28(4), L015-L031.
- FORD, D. T.; MORRIS, E. C. y FEDMAN, A. D., 1980. *Corps of Engineers experience with automatic calibration of a precipitation-runoff model*. In "Water and Related Land Resource Systems" (Y. Haimes and J. Kindler, eds.).
- GARFIAS, J., 1994. *Etablissement d'un modèle mixte pour des conditions complexes*. Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec, Canada, 220 p. + anexes.
- GUPTA, V. K. y SOROOSHIAN, S., 1985. *The automatic calibration of conceptual catchment models using derivative-based optimization algorithms*. Water Resour. Res., 21(4), 473-485.
- HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, 1981. *HEC-1, Flood Hydrograph Package*. Users Manual.
- IBBITT, R. P. y O'DONNELL, T., 1971. *Fitting methods for conceptual catchment models*. J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng., 97 (HY9), 1331-1342.
- IBRAHIM, Y. y LIONG, S. Y., 1992. *Calibration strategy for urban catchment parameters*. J. Hydraul. Eng., 118(11), 1550-1570.
- JATON, J. F.; MUSY, A. y REGAMEY, P., 1978. *Méthode de prédétermination des débits de ruissellement basée sur l'état de saturation antérieur du bassin*, IGR N° 142, Lausanne, 12 p. + anexes.
- JEWELL, T. K.; NUNNO, T. J. y ADRIAN, D. D., 1978. *Methodology for calibrating stormwater models*. J. Environ. Eng. Div. Am. Soc. Civ. Eng., 104(EE3), 485-501.
- JOBIN, D. L., 1982. *Application du modèle OTTHYMO sur un bassin expérimental suisse*. Département de Génie Civil, Université d'Ottawa.
- JOHNSTON, P. R. y PILGRIM, D. H., 1976. *Parameter optimization for watershed models*. Water Resour. Res., 12(3), 477-486.
- JORDAN, J. P. y WISNER, P., 1983. *Description du modèle OTTHYMO. Exemples d'application*, Université d'Ottawa.
- LIONG, S. Y.; CHAN, W. T. y LUM, L. H., 1991. *Knowledge based system for SWMM runoff component calibration*. J. Water Resour. Plann. Manage. Div. Am. Soc. Civ. Eng., 117(5), 507-524.
- LLAMAS, J., 1985. *Hydrologie générale: principes et applications*. Ed. Gaetan Morin, Canada.
- LLANOS, H., 1992. *Estudio hidrogeológico de la unidad de Urbasa Montes de Vitoria Treviño y sectores adyacentes*. Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco (UPV/EHU) Leioa. 334 p. + anexes.
- MEIN, R. G. y BROWN, B. M., 1978. *Sensitivity of optimized parameters in watershed models*. Water Resour. Res. 14(2), 299-303.
- NASH, J. E., 1957. *The form of the instantaneous Unit Hydrograph*. International Association of scientific Hydrology, Pub. 45, 3, pp. 114-121.
- SNYDER, F. F., 1938. *Synthetic unit hydrographs*, Transactions of the American Geophysical Union, Vol. 19, Part 1, pp. 447-454.
- SOIL CONSERVATION SERVICE, 1972. *National Engineering Handbook, Section 4*, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- WANG, Q. J., 1991. *The genetic algorithm and its application to calibrating conceptual rainfall-runoff models*. Water Resour. Res., 27(9), 2467-2471.

DRENAJE E IMPERMEABILIZACIÓN



CALIDAD CONTINUA Y ECONÓMICA

Un perfil de HDPE de alta resistencia a la compresión y un geotextil de porosidad regular, de imposible colmatación y muy resistente al desgarro.

Estos son los dos elementos que conforman una gama de geocompuestos para resolver con plena eficacia una gran variedad de necesidades de drenaje e impermeabilización.

Estas unidades pueden realizarse ahora más económicamente y, más importante, con la seguridad de una calidad constante:

- CORDRAIN®
- STABIDRAIN®
- PACDRAIN®
- ASPHADRAIN®

Marcas registradas por 

Soliciten información para sus proyectos.



Expandite, S.A.
Avda. General Perón, 8
28020 MADRID
Teléfono: (91) 672 32 02 - 07
Telefax: (91) 672 32 65

ES A BURHAY CASTROL COMPANY

Corte y envíe este cupón a Expandite, S.A.
Desearía recibir más información sobre sus productos

Nombre
Empresa
Cargo
Dirección
Población
C.P.
Tel.

Drayfil®



Depuradora de aguas residuales Bulea MURCIA. 120.000 m² (Impermeabilizada con lámina DRAYFIL. Embalses)

Marca la diferencia para culminar cualquier obra bien hecha.

Drayfil EDIFICIOS

Drayfil EMBALSES

Drayfil AGUA POTABLE

Drayfil TÚNELES

Drayfil PISCINAS

AISSONDEL LAMINADOS, S.A. es pionera en España en la investigación y desarrollo de las láminas impermeabilizantes de PVC para todo tipo de instalaciones, en la construcción, obras públicas, embalses y agricultura. Esta larga experiencia, unida a los constantes avances tecnológicos, la sitúa en la primera línea del sector.

Todas las láminas impermeabilizantes de PVC-P fabricadas por AISSONDEL LAMINADOS, S.A. bajo la marca DRAYFIL, poseen la certificación AENOR.



MIEMBRO DE LA
ASOCIACIÓN ESPAÑOLA
DE LOS PLÁSTICOS
PARA LA PROTECCIÓN
DEL MEDIO AMBIENTE



AISSONDEL
LAMINADOS, S.A.

