

DISEÑO DE UN MODELO DISTRIBUIDO ELEMENTAL PARA EL ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDROLOGICO DE UNA CUENCA VERTIENTE

José Carlos Robredo, Juan Angel Mintegui
Unidad de Hidráulica e Hidrología
Departamento de Ingeniería Forestal
E.T.S. Ingenieros de Montes (U.P. Madrid)

RESUMEN: En este artículo se desarrolla el esquema utilizado en la elaboración de un modelo distribuido básico, que permita un análisis detallado de los movimientos del agua que tienen lugar en una cuenca hidrográfica, además de estimar los efectos de estos flujos sobre el terreno, desde el punto de vista de la erosión.

El modelo en cuestión permite utilizar distintos intervalos de tiempo, a fin de poder aplicarlo indistintamente tanto en las simulaciones torrenciales (en las que se analizan tormentas concretas, que requieren de un mayor detalle), como en simulaciones continuas (correspondientes a precipitaciones normales) realizadas para prolongados períodos de tiempo y destinadas al conocimiento de las disponibilidades hídricas de la cuenca; ya sea desde el punto de vista de la aportación y regulación de los volúmenes de agua hacia los cauces y las zonas dominadas, o bien desde el punto de vista de las reservas de agua existentes en cada momento en el terreno, de las que se nutre la cubierta vegetal, protectora de la cuenca, para su propio desarrollo.

INTRODUCCION

A lo largo del tiempo, se han utilizado diferentes métodos para estimar las magnitudes de las distintas variables que intervienen en el ciclo del agua; así como para determinar la cuantía de los flujos hídricos que integran las distintas componentes del mencionado ciclo.

Entre dichos métodos, cabe destacar el basado en la medición del caudal líquido en una determinada sección del cauce. Sus objetivos son múltiples; por un lado, desde el punto de vista de los valores máximos originados por los eventos torrenciales, se trata de encontrar criterios para dimensionar obras hidráulicas de corrección en los cauces; por otro, en lo que se refiere a valores ordinarios, su finalidad se centra en conocer las aportaciones hídricas de la cuenca y, por tanto, en evaluar la capacidad de abastecimiento que puede proporcionar.

Cualquiera que sea la finalidad última, el dato en cuestión (la medida del caudal líquido en una sección dada del cauce) es el que tradicionalmente se utiliza

para contrastar, a nivel del conjunto de la cuenca hidrográfica, los resultados obtenidos por los distintos métodos que, partiendo de una determinada información meteorológica (análisis de las precipitaciones), estiman la distribución y movimiento del agua en la cuenca.

Las metodologías empleadas a lo largo del tiempo, para precisar la generación de los caudales líquidos, han evolucionado de forma importante. En la actualidad se dispone de herramientas sofisticadas, tanto para la recogida de los datos (Datalodgers), como para la representación cartográfica del terreno que constituye la cuenca hidrográfica, mediante la utilización de los Sistemas de Información Geográficos. Gracias a ellas, el análisis del ciclo del agua en la cuenca vertiente se puede estudiar con mayor detalle, acercándose cada vez más a los fundamentos físicos que encierra el fenómeno en cuestión.

En esta línea, se ha elaborado un modelo distribuido, que permita estimar las distintas variables hidrológicas del ciclo del agua, en cada punto concreto de la cuenca vertiente. También se integran en el modelo los

cálculos relativos a la evaluación de los procesos de erosión, que representan una problemática importante, íntimamente ligada al ciclo del agua; abarcando en su conjunto el análisis global de la dinámica propia de las cuencas hidrográficas.

ESQUEMA GENERAL DE CALCULO DEL MODELO

El modelo en cuestión, cuya finalidad es aportar una metodología útil para la ordenación agro-hidrológica de las cuencas hidrográficas (objeto de proyectos de restauración hidrológico-forestal), adopta una estructura distribuida tanto espacial como temporalmente; compuesta por unidades elementales homogéneas, que se considera como el método más idóneo para el objetivo que se persigue.

Las mencionadas unidades homogéneas se establecen mediante la superposición de una malla de celdas cuadradas, cuyo tamaño se fija en función del relieve del terreno.

Con este proceso se pretende la simulación de las variaciones de nivel de los distintos espacios de almacenamiento hídrico, desde el punto de vista temporal; así como el desplazamiento de los volúmenes de agua, tanto superficial como subterránea, sobre toda la extensión de la cuenca.

El marco de actuación vendrá definido por el conjunto de celdas, en las que se conocen todos los datos necesarios referentes a sus características morfológicas, fitológicas y litológicas. El terreno representado por estas celdas cubre la superficie sobre la que se quiere realizar el estudio hidrológico completo, que abarca tanto los eventos torrenciales como las precipitaciones ordinarias (no torrenciales).

Dado que la modelización se basa en el concepto de cuenca hidrográfica, la forma rectangular de la matriz no encaja sobre la forma irregular de la cuenca. Por esta razón, hay que marcar aquellas celdas sobre las que han de realizarse los cálculos, para diferenciarlas de aquellas otras que están situadas fuera del perímetro considerado y, por tanto, carece de sentido operar en ellas.

Para obtener esta relación de celdas válidas, no resulta fiable apoyarse en un mapa temático, donde se refleje el perímetro de la cuenca; pues al discretizarlo, se puede dar el caso de considerar celdas que posteriormente, atendiendo al modelado del terreno, no van a verter a través de la sección adoptada como de salida de la cuenca.

Por tanto, la forma de obtener el perímetro se apoya directamente sobre el modelado del terreno. Dada una

celda, como posición determinante de la sección de salida de la cuenca, se van analizando celda a celda todas las incluidas en la matriz y marcando aquellas que, saltando de celda a celda según la orientación de máxima pendiente de cada una de ellas, vierten sus aguas a través de la celda "guía".

El espacio temporal viene definido por dos valores: el tiempo de duración de cada intervalo y el número de intervalos que se pretenden calcular.

ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DEL MODELO EN RELACIÓN CON EL CICLO DEL AGUA Y EL BALANCE DE LA FASE LIQUIDA

Los fenómenos físicos constitutivos del ciclo del agua están condicionados por una serie de características morfo-edafo-fitológicas del terreno y sometidos a una serie de condiciones meteorológicas. Estas características se deben discretizar en función del tamaño establecido para la celda, que representa la unidad de estudio.

Se trata pues de modelizar los mencionados fenómenos en cada una de estas unidades, utilizando los datos concretos de cada celda.

Como se sabe, el ciclo del agua aglutina el conjunto de caminos y depósitos, por los que puede discurrir el agua a lo largo de su desplazamiento; desde unos puntos de almacenamiento a otros. Estos caminos están determinados por una fenomenología física, que depende de múltiples factores. La modelización matemática de estos caminos sólo puede tener en cuenta algunos de los parámetros que intervienen; es más, en la práctica únicamente se podrán considerar aquellos de los que se pueda disponer con cierta abundancia ó resulten fáciles de obtener.

El agua, elemento fundamental, puede encontrarse en varios estados y posiciones dentro de la porción de terreno que ocupan cada una de las celdas. Los estados son los ya conocidos: sólido, líquido y gaseoso. Este último no va ser tenido en cuenta, dado que los fenómenos físicos a estudiar se enmarcan fundamentalmente dentro del ámbito de la hidrología superficial y subterránea, donde el agua se encuentra, con notable diferencia, en estado líquido o sólido.

El proceso comienza con las precipitaciones, que provienen de la condensación de la fase gaseosa del agua presente en la atmósfera y su posterior caída en forma líquida ó sólida sobre la cuenca; en nuestras latitudes principalmente líquida.

Una vez sobre el terreno, se pueden distinguir tres posiciones básicas del agua, atendiendo a una distribución vertical:

- El agua en superficie, ya sea en forma de nieve (fase sólida) ó agua libre superficial (agua que discurre por regueros o cauces).
- El agua capilar, que es capaz de retener el suelo y la vegetación y que permanece estable en su posición, sin verse afectada por las fuerzas gravitatorias; constituyendo de este modo el almacén del cual se surte en parte la vegetación para su actividad fisiológica.
- El agua gravitacional, que atraviesa los primeros horizontes del perfil edáfico y se mueve o almacena en los horizontes próximos a la roca madre o a zonas impermeables.

La movilidad del agua dentro de cada celda, en sentido vertical, está condicionada a determinados parámetros internos; siendo en la práctica independiente (salvo en lo que respecta a las variables meteorológicas) de su situación espacial en la cuenca. Estos parámetros vendrán condicionados por la clase de vegetación existente, el tipo de suelo, su profundidad, etc.

Por el contrario, el movimiento horizontal del agua en la celda dependerá de la posición espacial de ésta, concretamente de su relación con las cotas de las celdas contiguas; dicho de otra manera, de

la pendiente del terreno en el punto en cuestión y de la orientación de dicha pendiente. Asimismo son factores importantes: la rugosidad superficial y subterránea del medio y el contorno en que discurre el agua, que, lógicamente, condiciona su movimiento.

El problema que se pretende abordar, consiste en la modelización de los mecanismos físicos, a través de los cuales el agua pasa de una posición a otra en sentido vertical y de una celda a otra en sentido horizontal.

El modelo propuesto intenta acotar de la forma más simplificada posible, pero sin perder rigor, estos canales de comunicación entre las distintas formas de

existencia de masas ó almacenamientos de agua.

El verdadero motor del ciclo hidrológico es la energía solar. Esta energía pone en movimiento las masas de agua al cambiarlas de estado (líquido-gas), haciéndolas ganar una energía potencial que luego les permitirá discurrir por el terreno, expandiéndose y modelando la superficie terrestre. Esta energía también condiciona la actividad vegetal, que actúa a modo de una bomba hidráulica, sacando agua del suelo e impulsándola en forma de gas a la atmósfera.

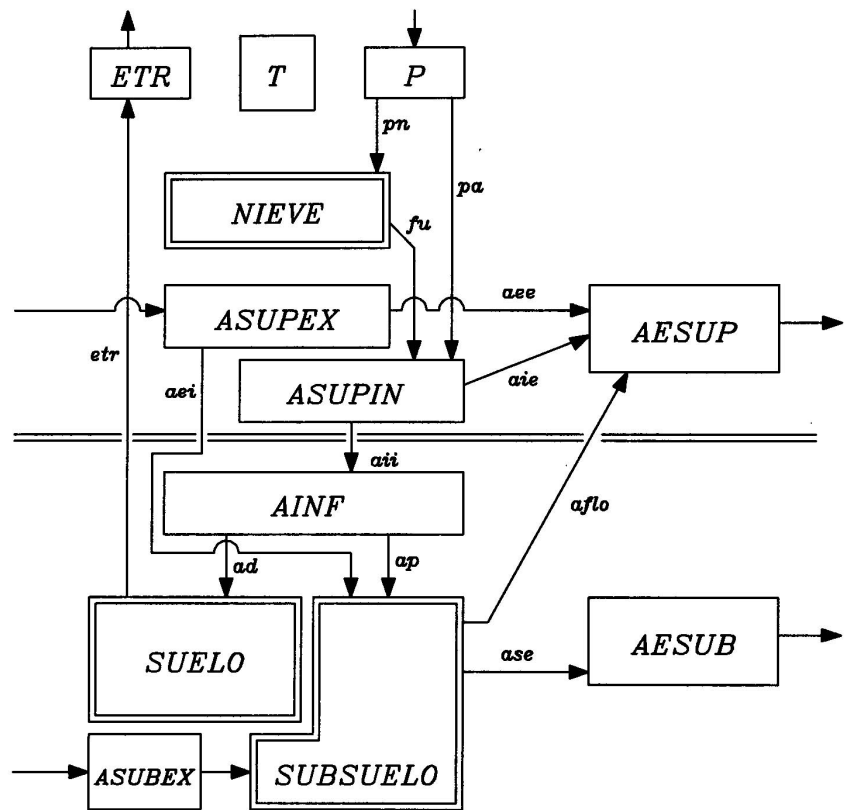


Figura 1

Para valorar la actividad solar en el modelo, se utiliza únicamente la temperatura. Se podría emplear también la radiación, pero es una variable mucho más difícil de obtener y los datos existentes y disponibles son escasos.

Una vez establecidos los factores motores (la energía potencial y la temperatura), se acotan las distintas posiciones en que puede encontrarse el agua y los canales de transferencia entre unas posiciones y otras.

El esquema general se refleja en la Figura 1. que se adjunta en la página siguiente, y consta de los siguientes términos:

■ **La nieve**

Constituye el almacenamiento de agua en estado sólido en la superficie. El canal de entrada, *pn*, lo establece la precipitación, cuando la temperatura es inferior a un determinado valor crítico TCN (°C) (Temperatura Crítica de Nieve); mientras que el de salida se define por la fusión nival, *fn*, que también es función de la temperatura y que se puede estimar mediante el método de *Grados-día*.

El fenómeno no es sencillo. Existen múltiples canales posibles que no se consideran, como pueden ser: los aludes, la sublimación o evaporación directa de la nieve, etc.

El hecho de considerar la precipitación en forma de agua (*pa*) cuando la temperatura es superior a TCN°C, supone asumir la presencia de escorrentía en la superficie, sin tener en cuenta cómo puede afectar la precipitación sobre el manto de nieve. Parece lógico pensar que la precipitación es absorbida por éste y que el volumen de agua que realmente pasa a la superficie del terreno proviene de la fusión de las zonas inferiores del mencionado manto y de los flujos de agua que atraviesan lentamente las capas de nieve. Este incremento de fusión se debe a la energía, tanto cinética como térmica, que aportan las gotas de lluvia.

A fin de simplificar la modelización del fenómeno, se asume que una determinada cantidad de precipitación origina un incremento de fusión de igual magnitud. De esta forma, cuando la temperatura es superior a TCN°C, el cálculo prescinde de considerar el manto de nieve, salvo para calcular la cantidad de nieve que se funde como consecuencia de la temperatura ambiental.

En resumen, se consideran dos canales de variación del punto de almacenamiento "NIEVE", ambos de carácter interno a la celda. Como canal de entrada la precipitación cuando la temperatura ambiental sea inferior a TCN°C y como canal de salida la fusión del manto de nieve.

■ **El agua superficial**

En este punto se considera todo el agua que llega a la superficie del terreno y tiene capacidad de moverse por efecto de la gravedad; es decir, que no está sometida a otras fuerzas que la retengan. La porción de agua que queda sobre la cubierta vegetal y el terreno, se considera como perteneciente al suelo; por tanto, se le supone que previamente a sufrido el paso, aunque sea ficticio, por el "canal" de infiltración.

El almacenamiento en este punto está condicionado al terreno. Al estar el volumen de agua en fase líquida, su movilidad es total y sólo existirá agua en esta situa-

ción, de una manera estable, si los canales de salida considerados no permiten la evacuación de la cantidad aportada por los canales de entrada, lo cual no es frecuente que suceda en cuencas de montaña donde las pendientes son importantes.

Como canales internos de entrada se establecen: la precipitación en forma de agua (*pa*), cuando la temperatura es superior a TCN°C, y la fusión de una parte del manto nival (*fu*), en el caso que exista.

La presencia de otras formas de aportes, como son las nieblas, las condensaciones (rocíos ó escarchas), etc., que en ocasiones pueden llegar a ser importantes, resultan muy difíciles de cuantificar con los datos que normalmente se disponen en los proyectos de restauración; por lo que se prescindirá de los mismos en el modelo. Aunque no se renuncie abordar estos temas en el futuro, en este momento se da prioridad a la claridad y sencillez en el análisis del fenómeno, eludiendo todos aquellos aspectos que no puedan recibir el tratamiento adecuado.

Como canal interno de salida se presenta únicamente la infiltración en el terreno ($A_{INF} = a_{ii} + a_{ei}$); ya que el otro canal, que sería la evaporación directa, se va a englobar en el cálculo de la evapotranspiración real (*etr*).

Como canales externos de variación para las entradas se consideran los aportes de otras celdas (ASUPEX), cuya "orientación" fuerce el desagüe de aquellas hacia la celda en cuestión; mientras que los canales de salida horizontales estarán constituidos por los volúmenes de agua aportados, de la misma forma, en dirección a otras celdas "aguas abajo" (AESUP). Este volumen de salida de agua de las celdas puede provenir de varios canales: del agua externa que sigue su curso (*aee*); del agua superficial interna que no se infiltra y comienza a escurrir (*aie*) y de los afloramientos debidos a la elevación de los niveles freáticos (*aflo*).

Dentro de esta posición hay que distinguir claramente entre dos tipos de agua superficial; la que tiene un origen "interno", es decir, proviene de la precipitación y de la fusión (ASUPIN), y la que llega por el canal de alimentación "externo", es decir, que procede de otras celdas (ASUPEX).

El agua superficial procedente de la precipitación y de la fusión se reparte uniformemente por la superficie y está sometido a un mecanismo de infiltración determinado. La cantidad retenida por el perfil superficial del suelo y la vegetación se puede estimar mediante el método del *Número de Curva del S.C.S.*

El agua "exterior" no se distribuye de una manera uniforme, sino que circula encauzado; es decir, se sitúa en unos puntos concretos de la celda (regueros y

cauces) y las pérdidas por infiltración, a los que lógicamente está sometido, tendrán que ser modelizadas de forma diferente.

El volumen de agua encauzado que sale de una celda hacia otras celdas aguas abajo, se distribuye en función de la velocidad que lleva el flujo en cada una de éstas, almacenando más en aquellas en las que el agua discurre con mayor lentitud y menos en aquellas en las que la velocidad sea más elevada. El cálculo de la velocidad, con la que discurre el agua en la red de drenaje, se realiza considerando el movimiento en cada celda como uniforme y permanente, utilizando en consecuencia una ecuación empírica, como puede ser la fórmula de *Manning*, sobre un cauce teórico cuya dimensión es función del área drenada a través de cada celda en particular.

Otro punto a tener en cuenta es el destino del volumen de agua laminar infiltrada ($AINF=aii$). La porción del mismo que puede quedarse en el suelo a disposición de la vegetación (*ad*), dependerá de la capacidad de retención de éste y de la humedad que tenga en ese momento. El resto (*ap*) circulará por gravedad hacia los horizontes inferiores. De esta forma quedan definidos dos canales internos y paralelos de salida.

El porcentaje que se infiltra procedente del agua encauzada (*aei*), pasa directamente al subsuelo. Es lógico pensar que en cauces y regueros el suelo esté saturado. La cantidad se estima utilizando una velocidad de infiltración prefijada para el conjunto de los cauces que discurren por cada celda.

Resumiendo, se establece la división del volumen de agua superficial en dos componentes independientes: El primero corresponde al agua que está distribuida uniformemente por toda la superficie; mientras que el segundo representa al agua encauzada proveniente de celdas situadas "aguas arriba".

Los canales de variación del volumen de agua superficial repartida uniformemente (ASUPIN) son:

- La precipitación, cuando la temperatura es superior a $TCN^{\circ}C$ (*pa*).
- La fusión nival (*fu*).
- La infiltración (*aii*).
- La escorrentía hacia celdas con cotas inferiores (*aie*).

Los canales correspondientes al volumen de agua superficial encauzada (ASUPEX) son:

- La escorrentía encauzada proveniente de celdas concotas superiores.
- La infiltración (*aei*).
- La escorrentía hacia celdas con cotas inferiores (*aee*).

El volumen del flujo laminar infiltrado (AINF) se redistribuye en los dos canales ya mencionados: uno hacia el SUELO (*ad*) y otro hacia el SUBSUELO (*ap*).

■ El agua en el suelo

Como se ha mencionado al hacer referencia al agua superficial, el porcentaje de agua que se considera en este apartado es el que está retenido, tanto en la cubierta vegetal como en las microdepresiones de la superficie del terreno y en los primeros horizontes del suelo, básicamente por las fuerzas de tensión superficial que impiden que actúen las fuerzas gravitatorias; quedando en posición estabilizada y por tanto disponible para las plantas como recurso hídrico almacenado (aunque no se trate del único que dispone la vegetación para su desarrollo).

Este volumen tiene un valor límite, que se corresponde con la capacidad de retención del suelo en cuestión, más la capacidad de intercepción de la cubierta vegetal.

Como canal de entrada a este volumen, hay que considerar la parte de la infiltración que es retenida y no pasa hacia los horizontes inferiores (*ad*); y como canal de salida se presenta la evapotranspiración real (*etr*), término que engloba la evaporación directa debida a la temperatura ambiental y la transpiración de la cubierta vegetal.

Aunque la evaporación depende de múltiples factores; sólo se tiene en cuenta la temperatura y el tipo de masa vegetal, para no limitar el uso del modelo propuesto a la disponibilidad de datos poco frecuentes. El método utilizado en este caso es el propuesto por *Thornthwaite* y *Mather*, ajustado a cualquier intervalo temporal y dotándolo de un coeficiente función del tipo de vegetación existente en la celda.

No existen canales de salida hacia celdas contiguas ni hacia el subsuelo, ya que por definición el agua considerada en este volumen (ó estado) no está sometida a las fuerzas gravitatorias y su posición es estable.

Resumiendo, tenemos un lugar de almacenamiento estable al que se denomina SUELO, y como canales de variación los siguientes:

- La infiltración retenida (*ad*)
- La evapotranspiración real (*etr*)

■ El agua en el subsuelo

Este volumen de agua hace referencia a los almacenamientos freáticos y los escurrimientos subsuperficiales que puedan existir.

El agua en este medio se mueve lentamente, salvo en zonas karsticas, por tanto presenta cierta estabilidad.

Como canales de variación de orden externo se pueden establecer dos: uno de entrada del agua procedente de las celdas con cotas más elevadas y otro de salida del agua con destino a celdas situadas en cotas inferiores. Este flujo se estudia mediante el movimiento del agua en medios saturados, utilizando la ecuación de *Darcy*.

Verticalmente, como canales de entrada se pueden definir: la parte de la infiltración laminar que atraviesa gravitacionalmente el suelo (*ap*) y la infiltración proveniente del agua encauzada (*aei*).

El canal de salida interno lo constituyen los posibles afloramientos por elevación de los niveles freáticos (*aflo*).

En resumen, se disponen de los siguientes caminos

que posibilitan la variación del volumen almacenado en el subsuelo:

- La entrada de agua procedente de las celdas situadas en cotas superiores (*ASUBEX*).
- La salida de agua hacia celdas situadas a cotas inferiores (*AESUB*).
- La infiltración gravitacional del agua superficial laminar (*ap*).
- La infiltración gravitacional del agua encauzada (*aei*).
- Los afloramientos por elevación del nivel piezométrico hasta la superficie del terreno (*aflo*).

ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DEL MODELO EN RELACION CON EL CICLO DE LA EROSION Y LA FORMACION DEL CAUDAL SOLIDO

Tabla 1

ELEMENTO	CANALES DE VARIACION (E= entrada, S = salida)	ECUACIONES O MODELOS EMPLEADOS PARA SU ESTUDIO
EN RELACION CON EL CAUDAL LIQUIDO		
NIEVE	(E) Precipitación en forma de nieve, <i>pn</i> . (S) Fusión nival, <i>fu</i> .	- Precipitación cuando la temperatura ambiental sea inferior a una determinada TCN. - Método de <i>Grados día</i> .
AGUA SUPERFICIAL	(E) Precipitación en forma de agua, <i>pa</i> . (E) Fusión nival. (E) Flujo encauzado proveniente de celdas situadas en cotas superiores, <i>ASUPEX</i> . (E) Afloramientos por elevación del nivel freático, <i>aflo</i> . (S) Infiltración de la lámina superficial, <i>aii</i> . (S) Infiltración del agua encauzada, <i>aei</i> . (S) Flujo encauzado hacia celdas situadas en cotas inferiores, <i>aei</i> y <i>aie</i> .	- Precipitación cuando la temperatura ambiental sea superior a una determinada TCN. - Estudio del flujo aplicando la fórmula de <i>Manning</i> . - Método del <i>Número de Curva</i> del S.C.S. - Velocidad constante de infiltración sobre la superficie mojada.
AGUA EN EL SUELO	(E) Infiltración retenida, <i>ad</i> . (S) Evapotranspiración, <i>etr</i> .	- Determinación de la <i>Capacidad de Campo</i> como límite máximo de almacenamiento. - Balance Hídrico de <i>Thornthwaite</i> y <i>Mather</i> .
AGUA EN EL SUBSUELO	(E) Flujo procedente de las celdas situadas en cotas superiores, <i>ASUBEX</i> . (E) Infiltración gravitacional del agua superficial, <i>ap</i> y <i>aei</i> . (S) Flujo hacia celdas situadas en cotas inferiores, <i>ase</i> . (S) Afloramientos por elevación del nivel freático.	- Estudio del flujo aplicando la fórmula de <i>Darcy</i> .
EN RELACION CON EL CAUDAL SOLIDO		
EROSIÓN EN EL SUELO	(S) Pérdidas de suelo.	- Aplicación de la ecuación <i>U.S.L.E.</i>
TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	(E) Pérdidas de suelo. (E) Materiales transportados procedentes de celdas situadas en cotas superiores. (S) Materiales transportados hacia celdas situadas en cotas inferiores.	- Cálculo de la máxima capacidad de transporte mediante la aplicación de la fórmula de <i>Smart</i> y <i>Jaeggi</i> .

La precipitación y el movimiento del agua sobre el terreno disgregan superficialmente al suelo y ponen en movimiento la totalidad ó parte de las partículas disgregadas, cambiándolas de su posición inicial.

La magnitud de este fenómeno depende de la intensidad de la precipitación y del volumen de agua que, al no lograr infiltrarse, discurre por la superficie.

Tal como aparece en el esquema de la Figura 2., se pueden diferenciar claramente dos procesos dentro del fenómeno de la erosión hídrica. Por un lado, se presenta la disgregación de las partículas debido a la energía cinética de la precipitación.

Esta energía, aportada por las gotas de lluvia, convierte a una parte del suelo en terreno potencialmente erosionable. Por otro lado, para completar el fenómeno, es imprescindible la existencia de una escorrentía superficial, capaz de poner en movimiento las partículas disgregadas. La magnitud de este fenómeno se estima mediante la aplicación del modelo *U.S.L.E.*

Dentro de la variedad de tamaños existentes en el conjunto de la textura del suelo, se pueden diferenciar dos grandes grupos de materiales. La razón de esta clasificación es la de estudiar cada uno de ellos, en la medida de lo posible, de forma independiente.

- Las partículas finas y medianas que, una vez disgregadas y puestas en movimiento por su incorporación a la escorrentía, no se depositan hasta que el agua disminuya considerablemente su velocidad (por reducción de la pendiente del lecho, entrada en embalses, zonas de inundación, o en el mar, etc.). Estos sedimentos tienen su origen en la erosión laminar y en regueros.
- Los elementos más gruesos. Son los materiales de mayores dimensiones, cuyo movimiento se debe al arrastre que ejerce sobre ellos el flujo circulante por los cauces. Representan un caudal sólido de fondo, que se pone en movimiento cuando el flujo toma unas magnitudes considerables. Este fenómeno constituye, básicamente, la erosión en los cauces.

La capacidad del flujo para transportar los elementos sólidos disgregados, así como para arrastrar los materiales del lecho, se estima mediante la fórmula de *Smart y Jaeggi*.

En síntesis, todos los procesos analizados se reúnen esquemáticamente en la Tabla 1.

FUNCIONAMIENTO GENERAL DEL MODELO

La estructura del "modelo" está pensada y desarrollada para su aplicación a cuencas de montaña; entendiéndose por tales aquellas cuencas vertientes en las que las

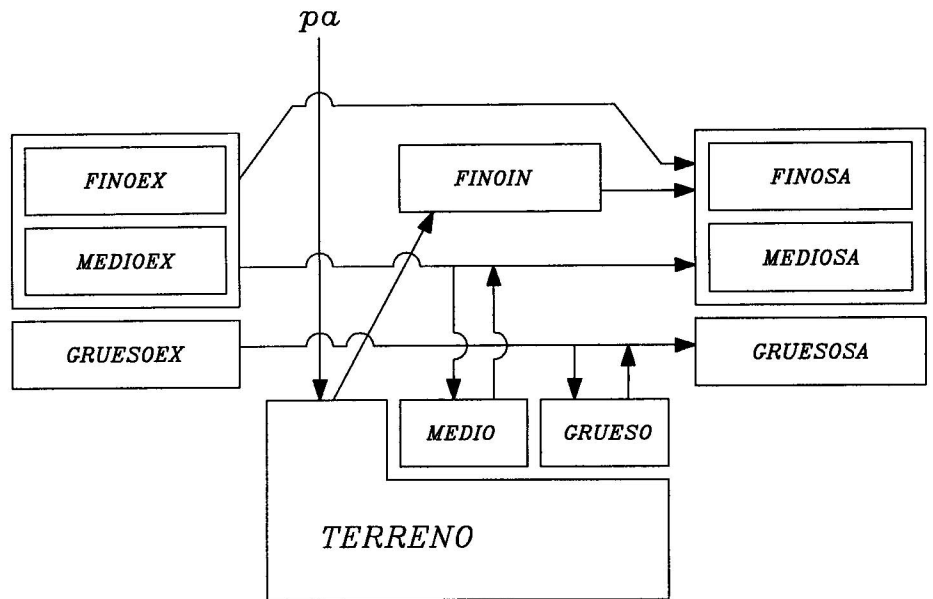


Figura 2

pendientes del terreno tienen la suficiente entidad, como para condicionar al flujo superficial a seguir unos caminos determinados, con independencia de la magnitud propia del flujo en cuestión. También es condición necesaria, que el agua superficial tenga total libertad de movimiento; es decir, que no esté retenido por estructuras de almacenamiento de dimensiones apreciables, como puedan ser embalses o lagos naturales de gran extensión.

Por otro lado, existe la posibilidad de variar las distintas ecuaciones empleadas para analizar los diferentes fenómenos físicos en el "modelo", si se deseara probar con otras y comparar los distintos resultados obtenidos.

En lo referente al funcionamiento del programa, se necesita disponer de la información que se comenta a continuación, la cual es preciso estructurarla del modo adecuado a los esquemas distribuidos.

Como dato básico de partida se requiere un "modelo del terreno"; es decir, una matriz de dimensiones ajustadas al tamaño de celda elegido, que almacene la altitud de cada una de las celdas. Basándose en estos valores, el programa calcula las pendientes del terreno en cada punto (celda), así como las orientaciones y cualquier otro dato que se necesite, relacionado con la topografía de la cuenca.

Con el fin de evitar cálculos inútiles y acortar el tiempo de ejecución del programa, ya de por sí largo en este tipo de modelos, se establece un marco de estudio. Dicho marco consiste en encuadrar una zona que englobe la cuenca o cuencas que se pretenden

estudiar, fuera del cual no se realizan operaciones. Este marco se define igualmente con una matriz, en la que se marcan con un 1 las celdas pertenecientes al área en cuestión y con un 0 las que queden fuera.

La superficie considerada se divide en un conjunto de zonas homogéneas y se asocia a cada una de ellas un bloque de valores para los parámetros utilizados por el "modelo". Las zonas se identifican con un número y se crea un archivo que relaciona el número identificativo con los valores correspondientes. La asociación de una determinada celda con sus parámetros se realiza mediante una matriz, que contiene el número de zona homogénea a que pertenece.

Los datos meteorológicos correspondientes a cada celda se asocian de la misma forma. Se crea una matriz cuyos valores sean los números de las estaciones ligadas a cada una de las celdas.

La información meteorológica mencionada, está recogida en un archivo; en el cual, además de los datos de precipitación y temperatura de cada una de las estaciones que intervienen, están relacionados los valores de los parámetros meteorológicos generales; empleándose estos últimos para la adaptación de la información puntual de cada estación a la posición de cada una de las celdas (gradiente de precipitación, gradiente de temperatura, etc.).

El proceso, a realizar en cada aplicación del modelo, consta de tres bloques operacionales. Cada uno de estos bloques comprende un programa y un bloque de datos necesarios para realizar los cálculos.

Los programas mencionados se denominan TES1, TES2 y TES3 ; cuyas funciones se explican a continuación:

PROGRAMA TES1: Este programa analiza el modelado del terreno, para comprobar si existen zonas endorreicas, efectuando correcciones mediante la elevación de la cota de la celda, hasta que al menos una de las celdas colindantes tenga una cota inferior. El modelo corregido se almacena en otro archivo.

PROGRAMA TES2: Este programa calcula las direcciones de vertido de todas las celdas y el área que drena por las mismas. Los resultados son almacenados para posteriormente ser utilizados como datos en el programa TES3.

PROGRAMA TES3: Este programa calcula las celdas pertenecientes a la cuenca vertiente, delimitada a partir de las celdas que aparecen en el archivo de celdas de salida. En aquellas consideradas como pertenecientes a la cuenca, realiza el cálculo del balance hídrico, partiendo de los datos meteorológicos almacenados en el archivo de datos (inputs) y en función de las caracte-

terísticas de la celda; registradas estas últimas en el archivo de los parámetros asociados a cada zona. Cada celda esta ligada a una de las estaciones meteorológicas mediante la matriz de estaciones, teniendo además un código de identificación de zona, almacenado en la matriz de zonas.

Los resultados generados por el programa son:

- Un archivo de caudales de salida, en m^3/s (valor medio en el intervalo de tiempo). También aporta otras variables referidas a dicho intervalo y a toda la cuenca considerada como unidad: precipitación media, en mm; evapotranspiración real, en mm; aportación hídrica, en mm; agua total almacenada en la cuenca, en mm; emisión de sedimentos, en t y emisión de acarreo, en t.
- Una serie de archivos correspondientes a las celdas de control que se hayan establecido.

Además crea el archivo *cuenca_v.res* en el que se almacenan las celdas pertenecientes a la cuenca vertiente mediante los códigos 0 y 1 (0 = no pertenece a la cuenca y 1 = si pertenece).

La situación inicial, de la que tiene que partir la simulación, está reflejada en unas matrices que contienen los valores de partida de las distintas variables de estado. Cada matriz se almacena en un archivo diferente. Al terminar la simulación, la situación final de las variables en cada una de las celdas se guarda en los mismos archivos.

El archivo que contiene el modelo de terreno a emplear en los programas TES2 y TES3, tiene que ser el generado por el programa TES 1.

APLICACION PRACTICA DEL MODELO A LA CUENCA ALIMENTADORA DEL RIO PORMA EN LA PROVINCIA DE LEON

La cuenca alimentadora del río Porma, desde su nacimiento hasta la estación de aforos de Camposolillo (dependiente de la Comisaría de Aguas del Duero y registrada con el número 78), está situada en la vertiente sur de la Cordillera Cantábrica, al norte de la provincia de León, lindando con Asturias en su divisoria por el norte y presenta una superficie de 14.410 ha.

El período seleccionado para la aplicación del "modelo", es el comprendido entre el mes de octubre de 1974 y el de septiembre de 1982 y las estaciones meteorológicas utilizadas son las siguientes:

<i>Estación</i>	<i>Código</i>
MARAÑA	2619
ISOBA (Parque de San Isidro)	2630A
COFÍNAL	2631
PUEBLA DE LILLO	2632
PANTANO DEL PORMA	2633

La cuenca se ha dividido en 4 zonas, aplicando el método de los polígonos de Thiessen. La primera zona se corresponde con las estaciones 2632 y 2633, la segunda con la 2631, la tercera con la estación 2630A y la cuarta zona con la 2619.

El intervalo de cálculo, para la simulación continua a lo largo del año, se establece en 24 horas, espacio de tiempo en el que están discretizados los datos meteorológicos recopilados.

Centrándose en la información pluviométrica, la precipitación en el "modelo" es variable en el tiempo y en el espacio (esta última variabilidad exige que los valores puntuales de cada estación se corrijan en función de la localización de cada celda); por todo ello resulta difícil representar gráficamente la pluviometría a la manera tradicional en el transcurso del tiempo.

Para resolver este inconveniente, se representa un valor medio para toda la cuenca, obtenido de sumar todo el volumen de agua que cae en el total de las celdas pertenecientes a la misma, en el intervalo considerado, dividido por la superficie de la cuenca. De esta forma se obtiene un valor representativo, muy próximo al concepto manejado tradicionalmente en la aplicación de los modelos integrados. En las Figuras 3 y 4 se muestra un ejemplo de estos valores.

Los pasos seguidos en esta aplicación del "modelo" parten de la configuración del "modelado del terreno", para lo cual se han digitalizado las curvas de nivel con equidistancia de 20 m., así como las cotas de los puntos singulares (picos, collados, cotas intermedias entre curvas de nivel en los fondos de valles, etc.) existentes en la cartografía a escala 1:50.000, utilizada al efecto. Esta información altimétrica se registra en proyección geográfica (latitud, longitud) y posteriormente se transforma a proyección U.T.M.

Mediante las funciones internas del sistema de información geográfico GENAMAP, utilizado en el desarrollo del "modelo", se elabora la matriz de altitudes en base a una malla de celdas de 100 m. de lado. También se establece un "marco de estudio", que engloba toda la cuenca que se pretende estudiar, fuera del cual no se analiza ninguna celda.

Las dimensiones de la matriz base corresponden a 186 líneas y 222 columnas, lo que supone un total de 41.292 celdas.

La cuenca se determina a partir de la celda en la que se encuentra la sección de salida. En este caso, la estación de aforos de Camposolillo (celda 142,133).

La determinación de las zonas homogéneas se lleva a cabo utilizando fotografías aéreas, los mapas de usos del suelo y los mapas de litofacies. Las manchas obtenidas se digitalizan y posteriormente se discretizan en función de la malla de celdas descrita.

La asociación entre los códigos de cada zona homogénea y las celdas, se realiza mediante la "matriz de zonas" (*zona.dat*). La asociación entre el código de cada zona y los valores asociados de los distintos parámetros, se realiza mediante el "archivo de parámetros de zona" (*zona.lis*).

El tiempo se ha discretizado en intervalos de 24 horas, ajustándose a los datos meteorológicos de que se dispone. Los 8 años que se simulan se dividen en bloques de duración igual a un mes. Los 96 archivos meteorológicos mensuales contienen la información de los parámetros meteorológicos generales y los datos de precipitación y temperatura de las cuatro zonas establecidas al efecto.

Cada celda está asociada a una de estas cuatro zonas mediante la matriz de estaciones (*esta.dat*). Los datos de precipitación y temperatura asociados serán posteriormente modificados en función de la situación de la celda.

APLICACION CONTINUA ANUAL UTILIZANDO INTERVALOS DIARIOS

Para comprobar la bondad de los resultados estimados con el "modelo", se necesita disponer de datos reales medidos en el terreno. Como se sabe, la única información de este tipo de la que se dispone, son los caudales medios diarios registrados en la estación de aforos de Camposolillo.

Admitida esta situación, se representan en unos ejes de coordenadas dados, tanto los hidrogramas anuales estimados con el "modelo", como los hidrogramas medidos en la estación de aforo de Camposolillo (lo que permite compararlos visualmente).

En aras de una mejor representación, se utilizan períodos de tiempo de seis meses. A modo de ejemplo se presentan las Figuras 5 y 6.

Por otro lado, el análisis de las distintas variables hidrológicas, que representan el estado de las diferentes posiciones de almacenamiento de agua, para cada localización concreta de la superficie de la cuenca, no tiene una fácil comprobación; como consecuencia de la inexistencia de datos sobre las mencionadas variables.

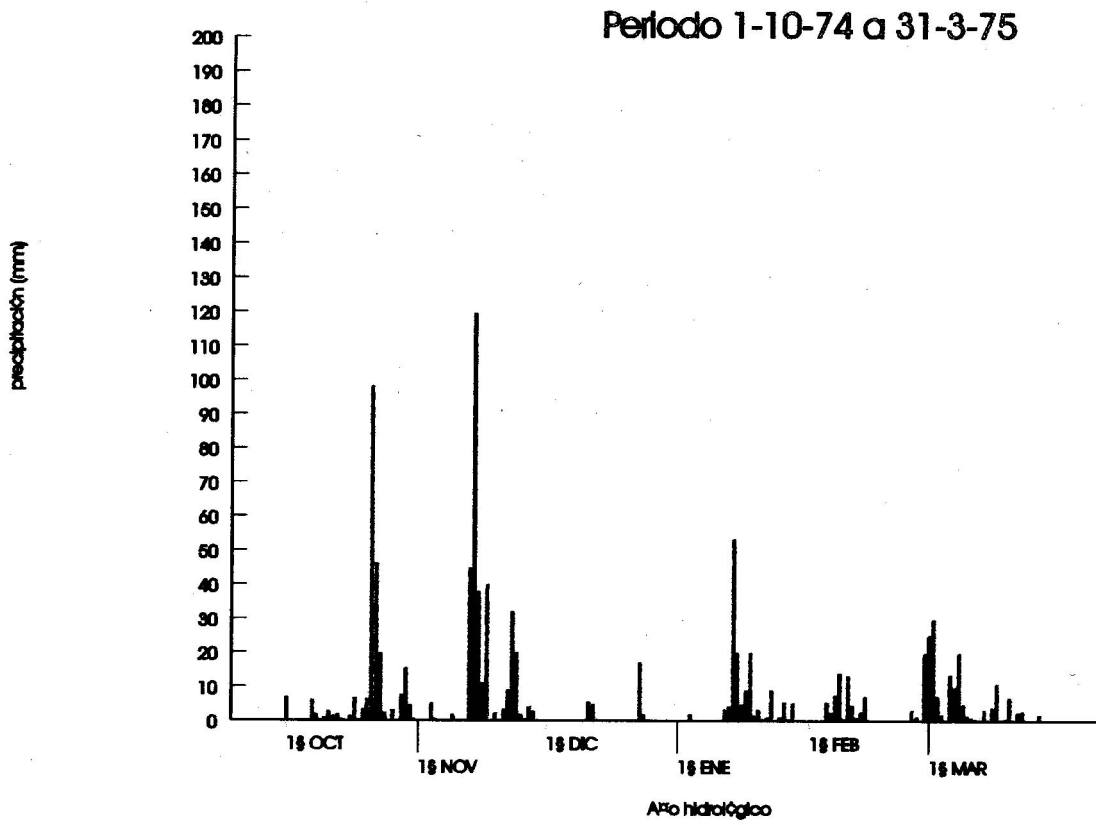


Figura 3.

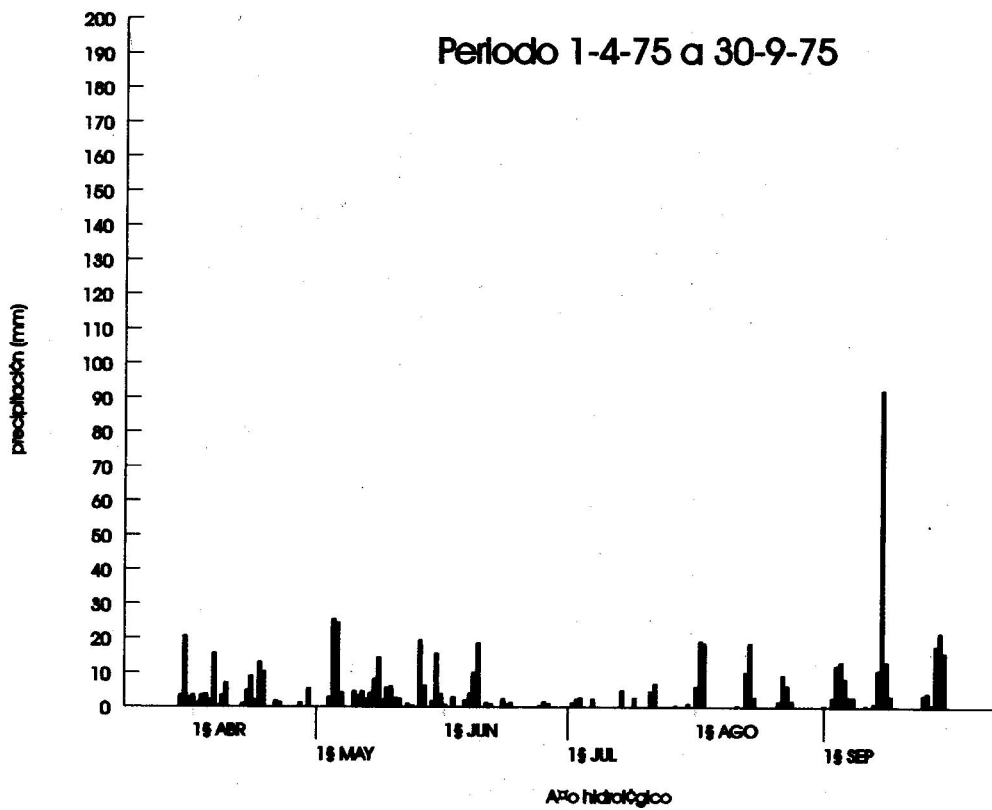


Figura 4.

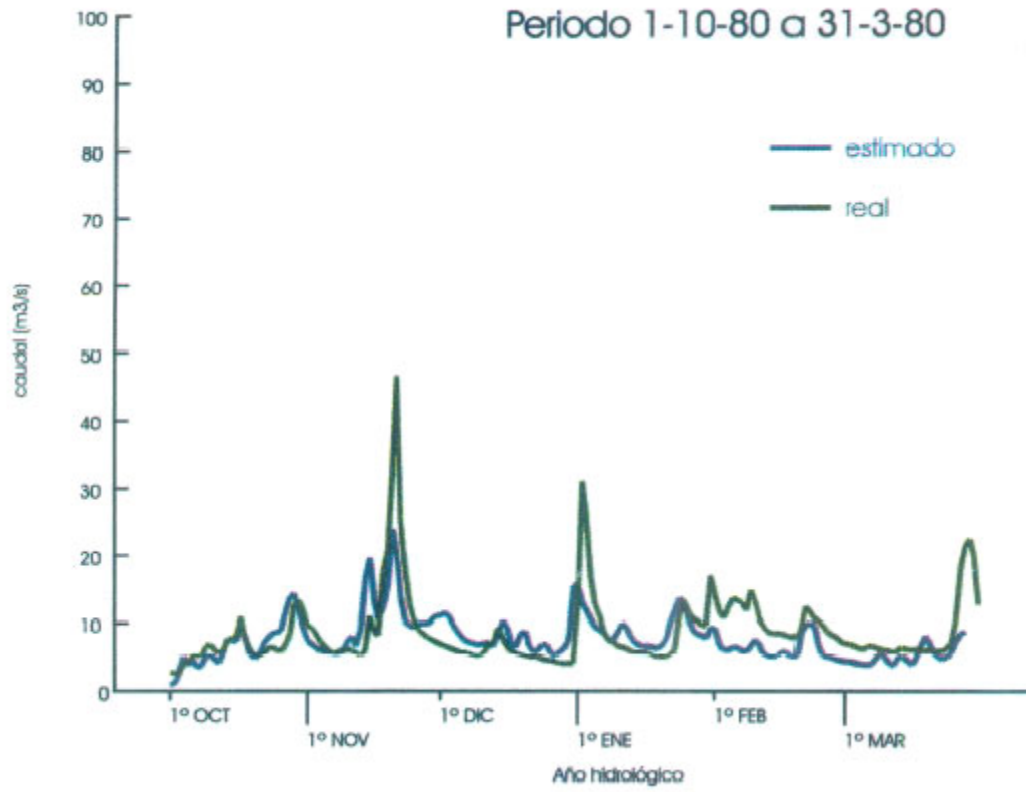


Figura 5.

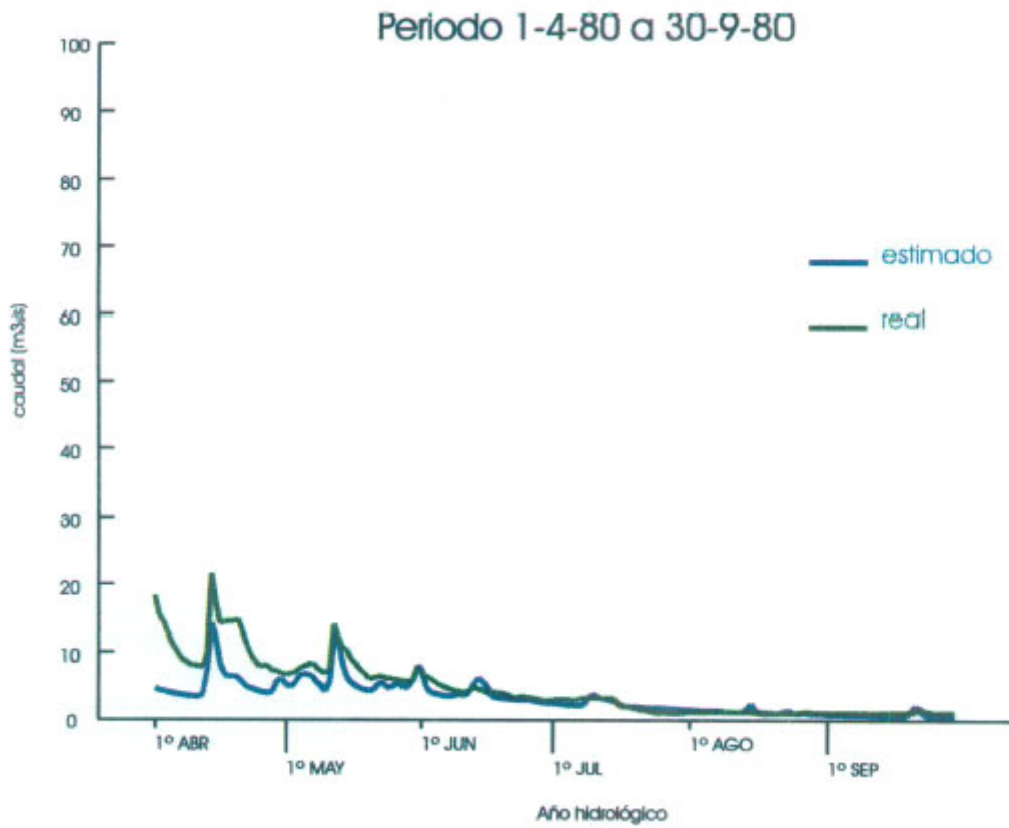


Figura 6.

Por esta razón, la bondad de las estimaciones realizadas a este respecto, se suponen validadas con el ajuste realizado con el caudal de salida de la cuenca; siendo este un valor integrador del movimiento hídrico general en el área de estudio.

A fin de representar estos valores y ante la imposibilidad de fijar los de todas las celdas integrantes de la cuenca, se fijan unos puntos concretos; a los que se denomina en adelante "celdas de control".

Como tales "celdas de control" se han fijado tres: la primera (64,47) está próxima a la estación de esquí de San Isidro, se asienta sobre matorral denso y el suelo presenta cierta profundidad. La segunda (66,138) se ubica en el pinar de Puebla de Lillo, sobre una ladera de umbría que vierte al arroyo del Pinar, presenta un arbolado denso y un suelo similar al de la celda anterior. Finalmente, la tercera (140,130) se sitúa en la zona baja de la cuenca, cerca de la estación de cierre, su suelo es más bien somero y esta cubierto de pastizal natural. Para referirse a ellas en los gráficos, se utilizan las letras *e*, *p* y *s*, respectivamente.

Como ejemplo de los resultados que se obtienen en dichas celdas, se aportan los gráficos correspondientes al año hidrológico 1979-80.

El factor fundamental que moviliza el agua en el suelo en sentido vertical es la temperatura; condicionando su forma cuando se trata de precipitaciones (agua o nieve) y determinando su magnitud cuando se refiere a la evapotranspiración. Esta depende básicamente de la latitud y altitud a la que este situada la celda, de su orientación y, claro está, de la época del año en que se considere su valor. El dato que se maneja en el "modelo" es, como se ha mencionado, la temperatura media diaria.

En la Figura 7 se muestra la evapotranspiración real acumulada a lo largo del año, para cada una de las tres celdas de control mencionadas.

La humedad del suelo, entendiéndose por tal el agua disponible para las plantas almacenada de una forma estable en el perfil edáfico, queda reflejada para el año en cuestión en la Figura 8. Los máximos alcanzados en las distintas celdas, vienen condicionados por la capacidad de retención de cada una de ellas. El agua que discurre lentamente por el subsuelo, representa las reservas hídricas de la cuenca y constituye la aportación de mayor calidad, que retrasada en el tiempo, contribuye a la generación de los caudales base.

Este tipo de almacenamiento en las celdas depende de la capacidad de infiltración existente en cada una de ellas, del agua que aporten las celdas situadas en cotas superiores y de la capacidad de almacenamiento propia de las mismas. En la Figura 9 se puede apreciar la variación de este agua subterránea, móvil, a lo largo del tiempo y en cada una de las celdas de control establecidas.

Una reserva hídrica importante, sobre todo en las cuencas de montaña como la que se analiza, lo constituye el manto de nieve que se va creando durante el invierno con las precipitaciones sólidas. La variación de este almacenamiento depende principalmente de la temperatura, tanto cuando aumenta con las nevadas, como cuando disminuye por la fusión del agua que lo integra. En la Figura 10 se muestran las variaciones estimadas en las celdas de control consideradas.

Los resultados obtenidos también permiten un análisis de la cuenca en su totalidad; que sirva, además, para controlar que el proceso de cálculo, realizado en las celdas, presente una coherencia global y que en todo momento exista un equilibrio entre las entradas y salidas. Una muestra de este análisis global se puede apreciar en el gráfico de la Figura 11.

APLICACION DEL "MODELO" A EVENTOS TORRENCIALES DE INTERVALOS DE CORTA DURACIÓN (DEL ORDEN DE MIN. A HORAS)

Como se ha mencionado, la concepción del modelo permite también el cálculo de los hidrogramas de avenida, para lo que únicamente exige establecer el intervalo de tiempo correspondiente, así como disponer de los datos de precipitación discretizados en función de dicho intervalo.

Dado que no se disponen de estaciones con pluviógrafo en la cuenca objeto de estudio, se aplicará, para la obtención del hidrograma, un hietograma tipo: el descrito en la publicación del IRYDA (1985) "*Diseño y construcción de pequeños embalses*", que se adjunta a continuación en la Tabla 2.

Para el cálculo de las precipitaciones máximas en intervalos de distintas duraciones, se aplica la expresión propuesta por J.R. TEMEZ (1987) en su publicación "*Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*".

$$\frac{I_t}{I_d} = \left(\frac{I_t}{I_d} \right)^{\frac{28^{0.1} - t^{0.1}}{28^{0.1} - 1}}$$

donde:

- t*, es la duración del intervalo de tiempo para el cual se pretende calcular la intensidad máxima.
- i_p*, la intensidad media máxima para una duración de *t* horas.
- I_d*, la intensidad media diaria correspondiente a una precipitación máxima en 24 horas con una recurrencia determinada.
- I_t/I_d*, un parámetro regionalizado que relaciona la intensidad máxima en una hora con la intensidad máxima diaria. Su valor oscila entre 8 para Galicia y la zona de Huelva y Cádiz, y 11 para la región mediterránea. En el centro de la Península es próximo a 10.

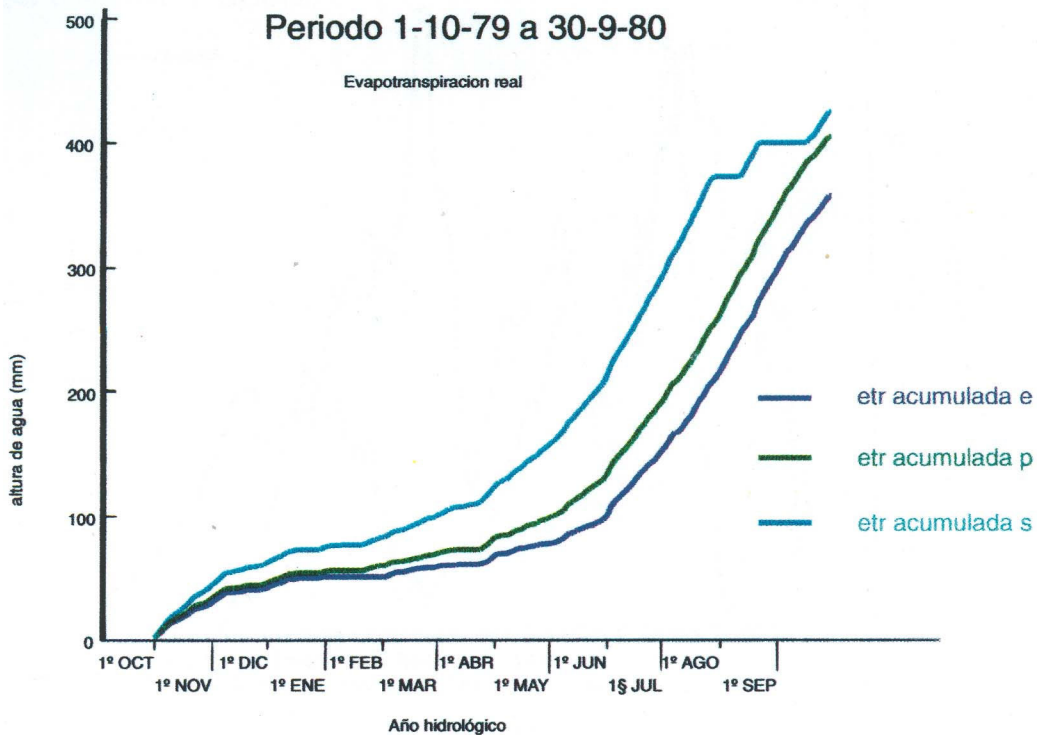


Figura 7.

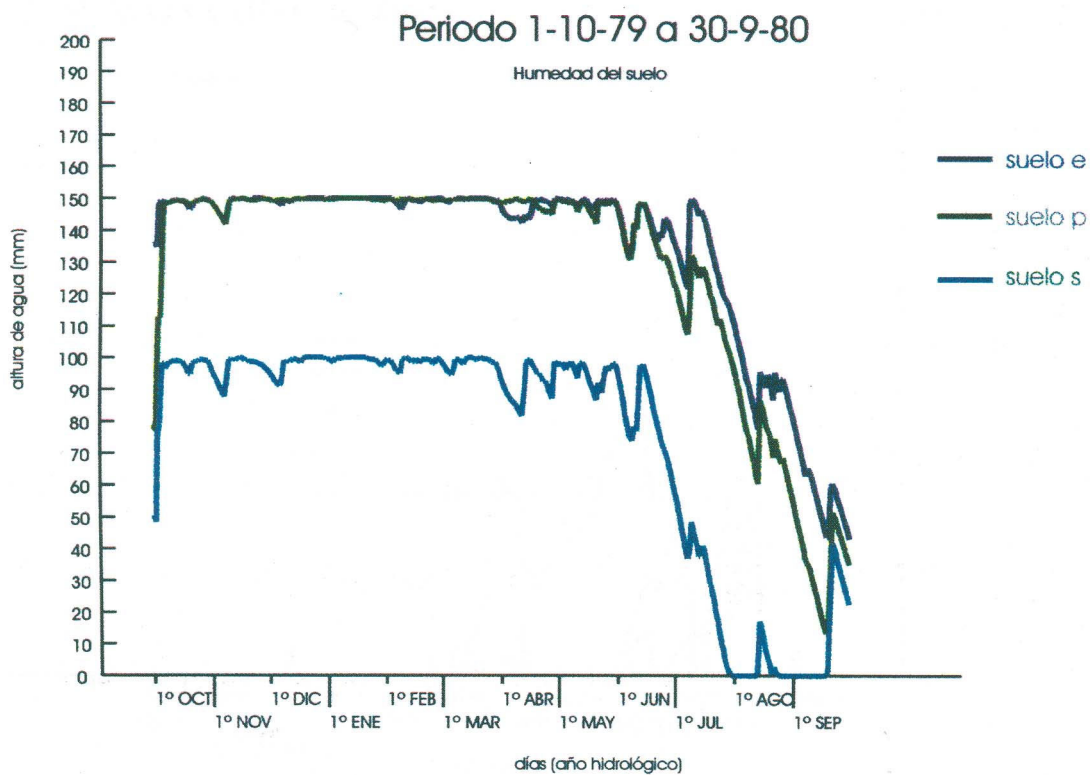


Figura 8.

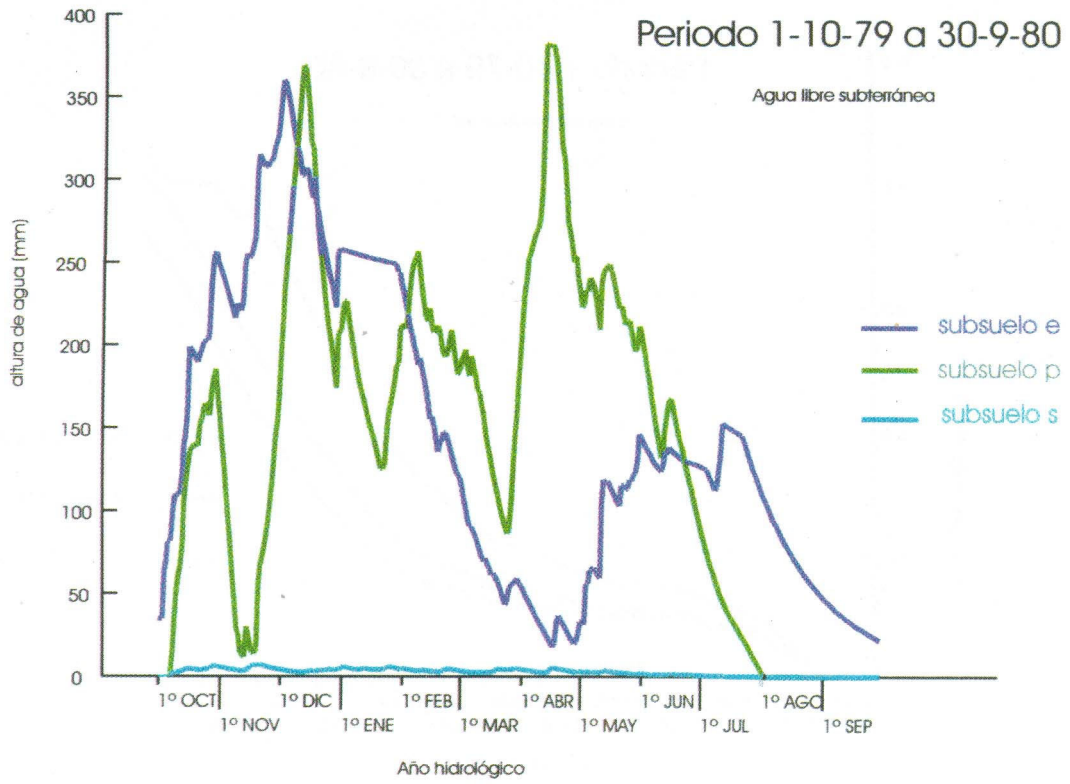


Figura 9.

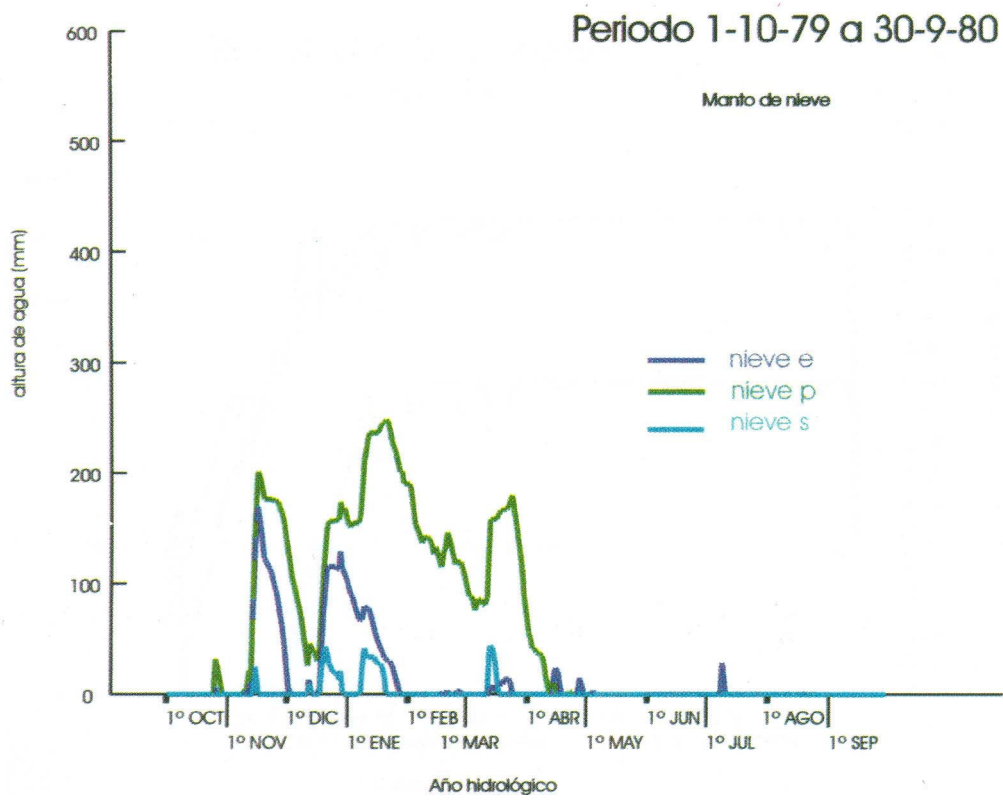


Figura 10.

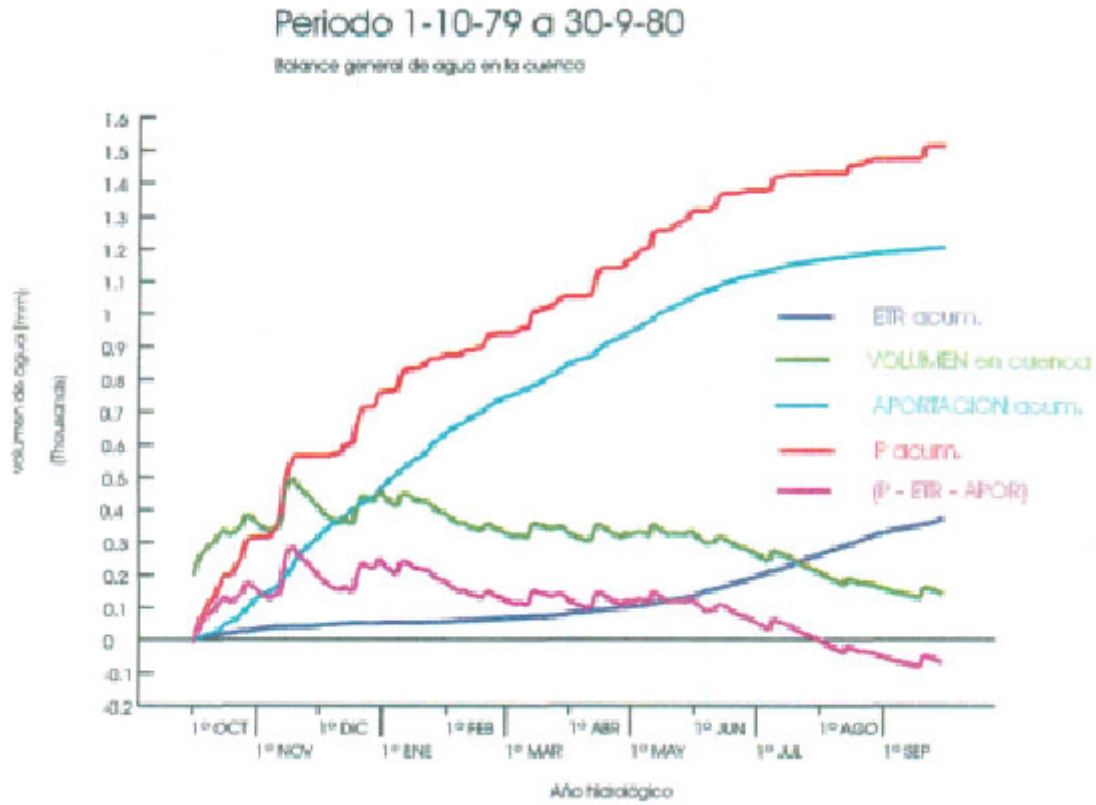


Figura 11.

Tabla 2.

HIETOGRAMA TIPO

Dado que los datos de precipitación disponibles hacen referencia a períodos de duración de 24 horas, se parte de este valor y se estiman las precipitaciones en duraciones inferiores, aplicando la ecuación mencionada anteriormente.

Analizando la serie de precipitaciones disponible en la estación de aforos de Camposolillo, se observa un evento de gran magnitud el 14 de octubre de 1974. La precipitación media registrada en ese día sobre la cuenca (estimada a partir de los datos de las estaciones utilizadas), fue de 143.9 mm.; mientras que el caudal real medido en la estación de aforos llegó a 49.1 m³/s, manteniéndose en este valor durante dos días.

Esta constancia hace suponer que seguramente hubo picos bastante mayores, de los cuales no hay información. En la simulación realizada con el "modelo", para intervalos de tiempo de 24 horas, el valor medio estimado para el caudal en ese mismo día resulta de 143.38 m³/s.

Intervalo (horas)	Incrementos de lluvia (mm)
0 - 1	0.15 δ
1 - 2	0.77 δ
2 - 3	0.19 δ
(a) 3 - 3.5	P _{0.5}
3.5 - 4	P ₁ - P _{0.5}
(b) 3 - 4	P ₁
4 - 5	0.17 δ
5 - 6	0.32 δ

(a) Tiempo de concentración < 2.5 horas
(b) Tiempo de concentración > 2.5 horas

donde: $\delta = P_6 - P_1$
 P_6 representa la precipitación máxima en 6 horas
 P_1 la precipitación máxima en 1 hora
 $P_{0.5}$ la precipitación máxima en media hora (Este último valor se utiliza solo cuando el tiempo de concentración de la cuenca es inferior a 2.5 horas).

Se ha simulado el aguacero, elaborando un hietograma sintético, con el fin de estimar el caudal punta que pudo alcanzarse para dicho evento. Partiendo del dato de 143.9 mm en 24 horas, se han obtenido los siguientes valores de las precipitaciones máximas para los intervalos que a continuación se refieren: para 6 horas 108.8 mm.; para 1 hora 53.9 mm. y para 0.5 horas 39.1 mm. La precipitación máxima en 6 horas se distribuye según el hietograma representado en la Tabla 2., tomando intervalos de 0.2 horas (12 minutos).

Otra tormenta registrada el día 3 de noviembre de 1976, en la que la precipitación fue de 100.5 mm de media en la cuenca, originó un caudal medio diario en la estación de aforos de 60.8 m³/s y un máximo instantáneo registrado de 73.5 m³/s (pie de página en el Anuario de Aforos). Aplicando el "modelo" con la simulación diaria, el valor obtenido asciende a 99 m³/s. (un 35 % superior).

Las precipitaciones máximas en 6, 1 y 0.5 horas (utilizando la misma distribución de intervalos que en la situación anterior) para la tormenta del día 14 de octubre de 1974, resultan respectivamente de: 76.0 mm.; 37.7 mm. y 27.3 mm.

Las Figuras 12 y 13 muestran las representaciones gráficas de estas tormentas.

A continuación se comparan los hidrogramas de avenida definidos para las dos precipitaciones extraordinarias mencionadas, aplicando dos metodologías diferentes; la basada en el presente "modelo" de tipo distribuido y la utilizada por el programa informático CAUDAL3, de estructura integrada, empleando dos tipos de Hidrograma Unitario (el H.U. triangular y el H.U. adimensional, ambos del USDA S.C.S.). El resultado de esta confrontación se muestra en la Tabla 3.; que se complementa con los valores obtenidos de realizar una utilización conjunta de ambas metodologías.

Esta última se fundamenta en la definición de un nuevo Hidrograma Unitario, calculado expresamente para la cuenca de cabecera del río Porma, mediante la utilización del "modelo" descrito en este artículo.

Se puede observar que de esta forma se obtiene un hidrograma de avenida intermedio, entre el generado con la aplicación estricta de un modelo integrado clásico y el que se deriva de la aplicación del "modelo" en cuestión.

Los hidrogramas que representan estas avenidas extraordinarias, se muestran en las Figuras 14 y 15. En dichos gráficos aparecen, para cada tormenta, los hidrogramas obtenidos mediante el programa CAUDAL3, utilizando los dos Hidrogramas Unitarios ya

citados, así como aplicando el Hidrograma Unitario precalculado mediante el "modelo". Finalmente, se aporta el hidrograma obtenido mediante el uso del "modelo" descrito tal como es, con las peculiaridades propias de una estructura distribuida.

CONCLUSIONES

La información foronómica disponible no permite aportar conclusiones definitivas; no obstante, se pueden extraer algunas consecuencias válidas y de interés para la ordenación agro-hidrológica de las cuencas hidrográficas.

En primer lugar, los caudales proporcionados por el "modelo" en cuestión, cumplen con la ecuación de continuidad y el volumen total de escorrentía, estimado con el mismo, se ajusta satisfactoriamente; siempre y cuando se trate únicamente de la transformación lluvia-escorrentía (Figura 5, 6 y 11). No es así cuando en ella interviene en el fenómeno inducido de la fusión nival, pues el "modelo" en cuestión subestima los caudales líquidos en los períodos en los que se producen los deshielos, aspecto que podrá ser subsanado en versiones posteriores. Además, la información que a este respecto se dispone por el momento en España es más bien escasa.

Por otro lado, los caudales punta establecidos con el "modelo" en cuestión son menores y más próximos a los caudales punta aforados (Figuras 14 y 15). Si bien este aspecto es general a todos los modelos distribuidos, parece coincidir con los valores reales que se registran en las estaciones de medida.

Este mejor ajuste entre los caudales estimados y los medidos en los modelos de estructura distribuida frente a los modelos integrados, se considera que es debido a que los primeros tratan de precisar y cuantificar mejor el fenómeno físico de la generación de los caudales de avenida; lo que escuetamente se puede expresar diciendo que: "los modelos distribuidos tratan de aclarar la caja negra sobre la que se construyen los modelos integrados"

El "modelo" descrito permite analizar, no sólo la generación de los caudales de avenida, dentro de un esquema general precipitación-escorrentía-caudal; sino que trata de simular al mismo tiempo el análisis global del ciclo del agua.

Por tanto, estudia con mayor profundidad los procesos de infiltración y retención del agua en el suelo, e incorpora en su esquema la circulación de los flujos superficiales, sub-superficiales y subterráneos; así como el retorno del agua a la atmósfera, calculando la evapotranspiración real.

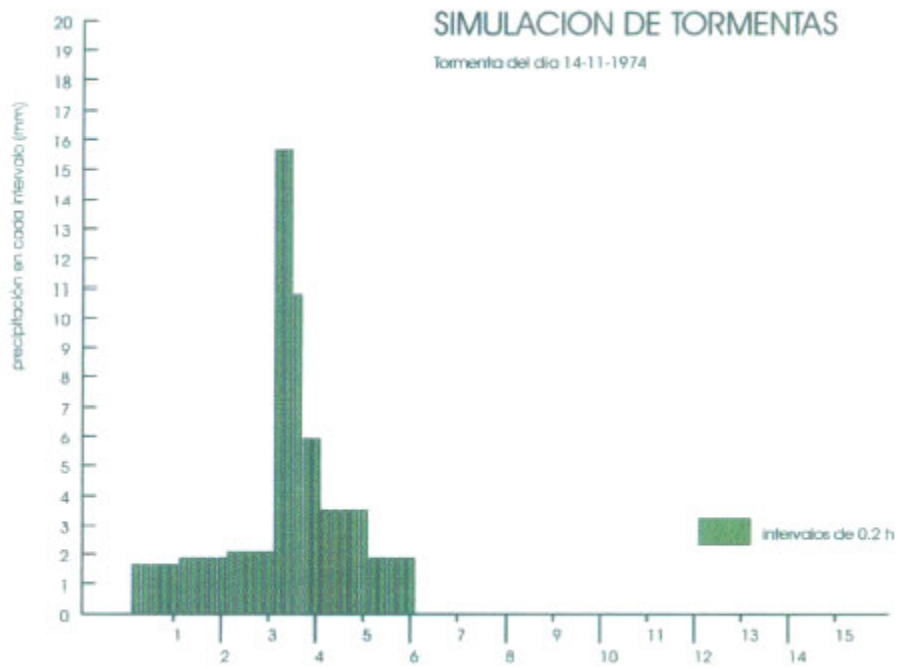


Figura 12.

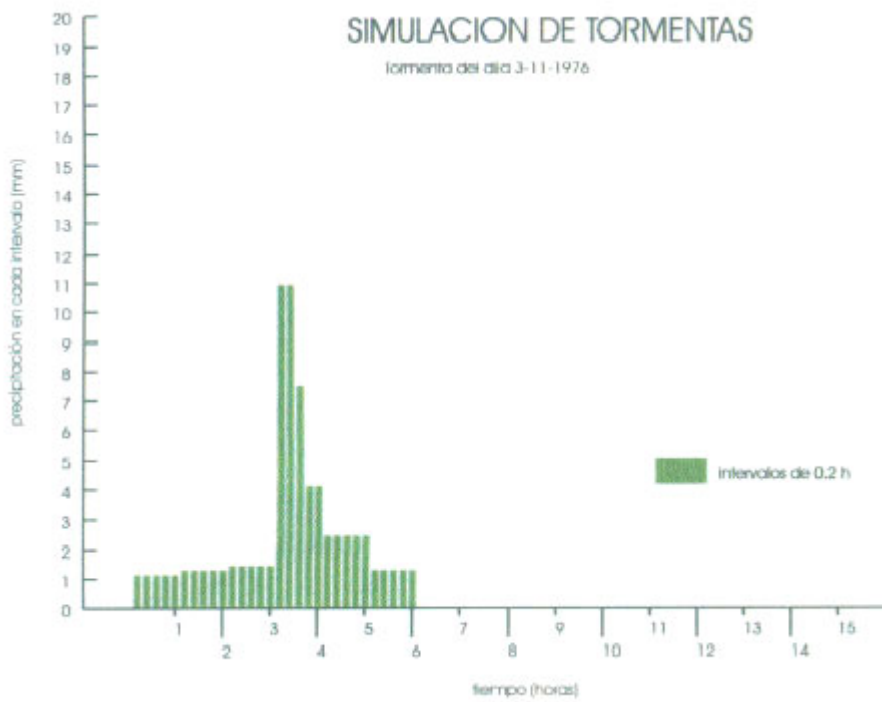


Figura 13.

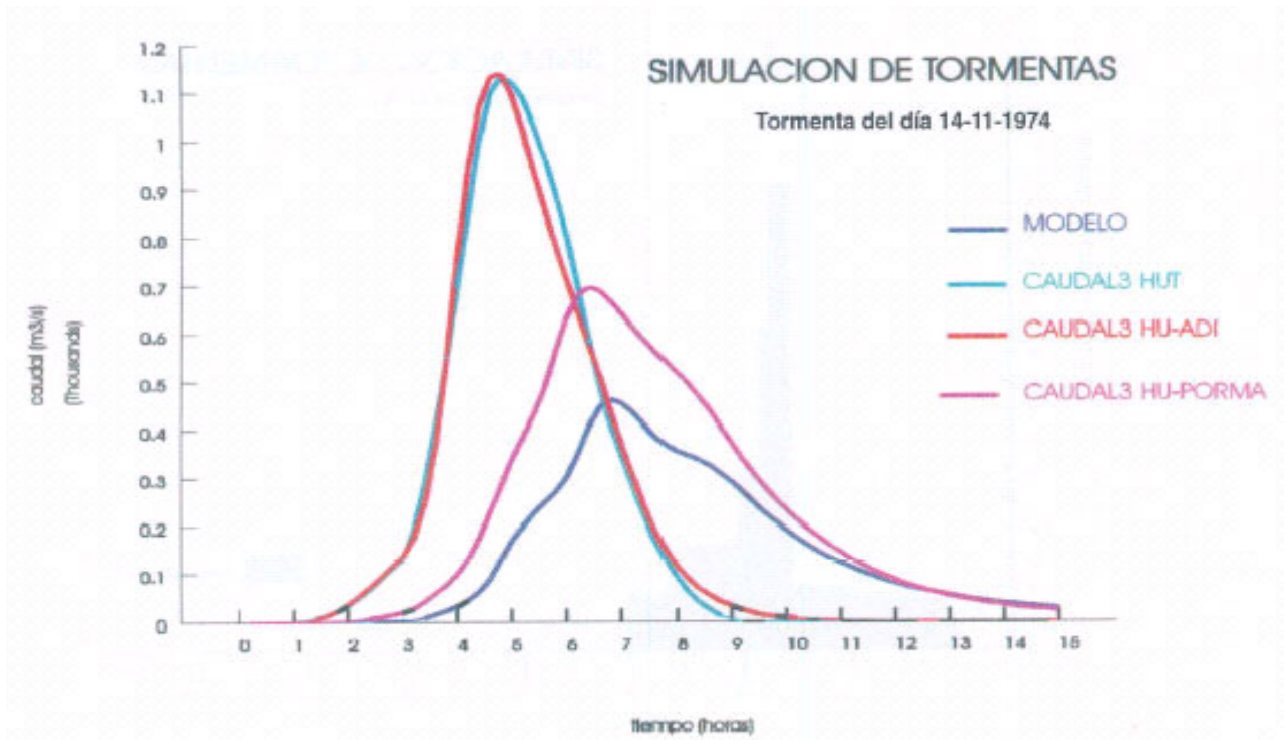


Figura 14.

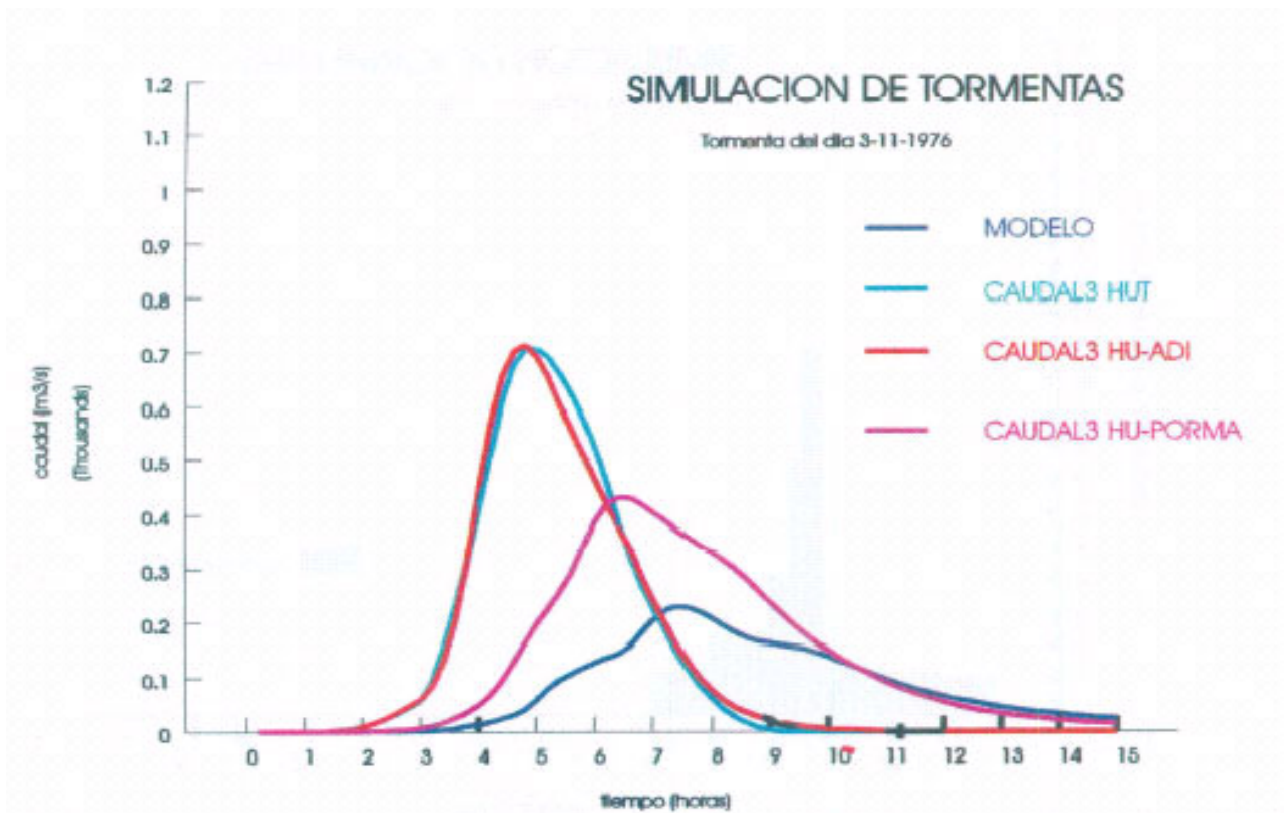


Figura 15.

Tabla 3.

ANÁLISIS DE RESULTADOS CORRESPONDIENTES A LOS EVENTOS TORRENCIALES CONOCIDOS EN LA CUENCA DE CABECERA DEL RÍO PORMA (LEÓN).-
COMPARACIÓN DE LAS DIFERENTES METODOLOGÍAS EMPLEADAS PARA LA ESTIMACIÓN DE LAS VARIABLES HIDROLÓGICAS ESTUDIADAS, INCLUIDO
EL "MODELO" OBJETO DEL PRESENTE ARTÍCULO

METODOLOGÍA UTILIZADA PARA EL ANÁLISIS DE LAS VARIABLES HIDROLÓGICAS	EVENTOS DE PRECIPITACIÓN EXTRAORDINARIA ANALIZADOS Y VARIABLES HIDROLÓGICAS EVALUADAS PARA LOS MISMOS; COMPARACIÓN CON LOS VALORES AFORADOS									
	FECHA 14-10-1974					FECHA 3-11-1976				
	DETERMINACIONES		DATOS AFORADOS		DETERMINACIONES		DATOS AFORADOS			
q_{p0h} (m^3/s)	t_p (h)	q_m 24h (m^3/s)	q_m 24h (m^3/s)	q_{p6h} (m^3/s)	t_s (h)	q_m 24h (m^3/s)	q_m 24h (m^3/s)	q_{m^24h} (m^3/s)	$q_{máx.inst.}$ (m^3/s)	
1.- Modelo desarrollado en el presente artículo	462	6.8	92.9	49.1	229	7.4	53.4	60.8	73.5	OBSERVACION: Este dato aparece a pie de página en el Anuario de Aforos
2.- Procedimiento integrado clásico para el análisis de las variables:	1129	4.8	135.2	OBSERVACION: Este valor se prolongó dos días (según datos del río), lo que hace suponer ^{la} ^{existencia} de elevados para intervalos más ^{de} ^{los} ^{anteriores} conos	705	5.0	83.8			
2.a.- Utilización del H.U. triangular del USDA S.C.S.	1137	4.8	135.2		711	4.8	83.8			
2.b.- Utilización del H.U. adimensional del USDA S.C.S.	694	6.4	134.0		431	6.4	83.1			
3.- Procedimiento intermedio basado en el uso de un H. U. elaborado a partir del modelo distribuido descrito en este artículo										

Para el cálculo del tiempo de concentración, empleado en la elaboración de los Hidrogramas Unitarios siméticos del USDA S.C.S., se ha utilizado la fórmula de Kirpich o de California, obteniéndose un valor para la cuenca estudiada de 1.96 horas.

q_{p6h} caudal punta generado por la precipitación de 6 h. de duración (analizada según el diseño de la Tabla 1).

t_p tiempo punta.

q_m 24h. caudal medio en 24 horas correspondiente a la escorrenia generada por la precipitación de cálculo.

$q_{máx.inst.}$ caudal máximo instantáneo registrado en la estación de aforos.

Como consecuencia de todo ello, evalúa las disponibilidades hídricas en las distintas zonas de la cuenca hidrográfica a lo largo del tiempo; aspecto este último que resulta un factor de ajuste para los diferentes parámetros fito-climáticos y, por tanto, ofrece un valor añadido en la ordenación agro-hidrológica de las cuencas vertientes, objeto de corrección.

El "modelo" permite estimar las pérdidas de suelo en cada punto concreto de la cuenca, cualquiera que sea el período de tiempo. También permite el estudio de la erosión en los cauces y la emisión de sedimentos fuera de la cuenca. En resumen, se puede estudiar y estimar, en un proceso único, los objetivos tradicionalmente abordados por los modelos U.S.L.E. y M.U.S.L.E., pero superando la estructura operativa de ambos.

Bajo el punto de vista eminentemente práctico, la aplicación del "modelo" a la planificación agrohidrológica de las cuencas, presenta las siguientes ventajas y limitaciones:

- a) *Realiza un análisis completo de la situación, al tomar de referencia el comportamiento del ciclo del agua y su incidencia en la cuenca hidrográfica; evaluando también los procesos derivados del geodinamismo torrencial.*

El conocimiento de ambos aspectos tiene una incidencia importante a la hora de proyectar las acciones restauradoras, a base de crear coberturas vegetales permantes, fundamentalmente mediante repoblaciones forestales con ánimo de restablecer el bosque, en aquellas zonas en las que la edafología y el clima lo permitan.

Evidentemente las áreas más necesitadas de este tipo de protección son las cabeceras de las cuencas hidrográficas y las superficies que por su alto grado de degradación requieran cubrir el suelo en el menor tiempo posible.

- b) *Desde el punto de vista de las obras hidráulicas de corrección de torrentes, el "modelo" ofrece algunas aportaciones de interés, aunque conviene advertir también ciertas precauciones en su empleo.*

Dentro de las aportaciones, se señala la mejor aproximación que proporciona el "modelo" en la definición de los caudales de cálculo; lo que en ciertos casos se puede traducir en un esquema de corrección del torrente con un volumen de obra más reducido y en consecuencia de menor coste.

En favor de esta opción se encuentra la filosofía tradicional de los restauradores de montaña clásicos; pues para ellos, al restaurar la cuenca alimentadora al mismo tiempo que se realiza la corrección del torrente,

los caudales que discurren por éste tienden a regularizarse.

Sin embargo en cuencas en las que existe cierta incertidumbre sobre la previsible restauración la cubierta vegetal de la cuenca en un plazo razonable (por ejemplo: áreas de la vertiente mediterránea muy degradadas y en ocasiones amenazadas de incendios), puede resultar más prudente seguir manejando los métodos genéticos de estimación de los caudales punta, que proporcionan valores más altos y por tanto actúan del lado de la seguridad.

En tales situaciones las dimensiones de las obras de corrección deben responder no sólo al fenómeno hidráulico, sino también a los intereses socioeconómicos de la área de inundación. En definitiva, termina la investigación donde comienza el compromiso de la ingeniería.

- c) *Finalmente, el "modelo" en cuestión se presenta como un prototipo de una línea de modelos distribuidos espacialmente, que tras nuevas investigaciones sobre el tema, proporcione "otro" más preciso, que permita un análisis más concreto de las cuencas hidrográficas necesitadas de proyectos de restauración hidrológico-forestal.*

SIMBOLOS UTILIZADOS

<i>ad</i>	agua disponible retenida en los horizontes superficiales al alcance de la vegetación (mm)
<i>aee</i>	agua encauzada proveniente de celdas superiores que pasa a celdas inferiores.
<i>aei</i>	infiltración de agua encauzada (mm)
<i>A ESUB</i>	altura de agua subterránea que proviene de otras celdas, al final del intervalo de tiempo (mm).
<i>A ESUP</i>	caudal de agua superficial que proviene de otras celdas, al final del intervalo de tiempo (m ³ /s).
<i>aflo</i>	afloraciones por elevación del nivel freático (mm)
<i>aie</i>	agua interna exportada. Escorrentia superficial (mm)
<i>aii</i>	agua interna infiltrada. Infiltración (mm)
<i>AINF</i>	agua infiltrada (mm)
<i>ap</i>	agua que pasa a horizontes más profundos (mm)
<i>ase</i>	agua subterránea exportada a celdas inferiores (mm)
<i>A SUBEX</i>	agua subterránea proveniente de celdas superiores.
<i>A SUPIN</i>	agua superficial interna correspondiente a la suma de la precipitación en forma de agua y la fusión nival.

<i>A SUPEX</i>	caudal de agua superficial que proviene de otras celdas, al comienzo del intervalo de tiempo (m^3/s).
<i>etp</i>	evapotranspiración potencial (mm)
<i>etr</i>	evapotranspiración real (mm)
<i>FINOEX</i>	materiales finos que en un momento determinado está transportando el flujo.
<i>FINOIN</i>	materiales finos procedentes de la erosión laminar en la celda, que se incorporan a los cauces.
<i>FINOSA</i>	materiales finos exportados fuera de la celda por el flujo circulante.
<i>fu</i>	fusión nival (mm)
<i>GRUESO</i>	materiales gruesos existentes en la red de drenaje.
<i>GRUESOEX</i>	materiales gruesos que en un momento determinado está transportando el flujo.
<i>GRUESOSA</i>	materiales gruesos exportados fuera de la celda por el flujo circulante.
<i>I_t</i>	la intensidad media máxima para una duración de t horas.
<i>I_d</i>	la intensidad media diaria correspondiente a una precipitación máxima en 24 horas con una recurrencia determinada.
<i>I_f/I_d</i>	un parámetro regionalizado que relaciona la intensidad máxima en una hora con la intensidad máxima diaria. Su valor oscila entre 8 para Galicia y la zona de Huelva y Cádiz, y 11 para la región mediterránea. En el centro de la Península es próximo a 10. <i>MEDIO</i> materiales medios existentes en el lecho de la red de drenaje.
<i>MEDIOEX</i>	materiales medios que en un momento determinado está transportando el flujo.
<i>MEDIOSA</i>	materiales medios exportados fuera de la celda por el flujo circulante.
<i>NC</i>	Número de Curva, depende de la vegetación y de la litofacies.
<i>NIEVE</i>	altura de nieve almacenada en la celda (mm de agua).
<i>P</i>	la cantidad de precipitación.
<i>pa</i>	precipitación en forma de agua (mm)
<i>pn</i>	precipitación en forma de nieve (mm)
<i>q_p</i>	caudal punta (m^3/s)
<i>SUBSUELO</i>	altura de agua existente en el subsuelo (mm).
<i>SUELO</i>	altura de agua disponible para las plantas (mm).
<i>T</i>	temperatura del aire (°C).
<i>t</i>	tiempo (horas).
<i>TBF</i>	temperatura base de fusión aplicable a cada celda, dependiente de la vegetación (°C).
<i>TCN</i>	temperatura crítica de precipitación en forma de nieve, depende del intervalo de tiempo considerado ya que estamos utilizando temperaturas medias (°C).
<i>TERRENO</i>	variación acumulada a lo largo del tiempo de los materiales que constituyen la superficie de la cuenca.

REFERENCIAS

- Beven K.J. (1985) *Distributed models Hydrological Forecasting*. Anderson & Burt editores, Wiley, New York. pp. 405-435.
- Beven K.J. y Kirkby M.J. (1979) *A physically-based variable contributing area model of basin hydrology Hydrological Sciences Bulletin* 24(1), 43.
- Catalina Mimendi M.A. (1992) *Análisis del comportamiento de las ramblas: Aplicación a los cursos Rambla de Valcabra y Rambla de Moras en la cuenca alimentadora del río Negatín (Granada) Tesis Doctoral*. Departamento de Ingeniería Forestal. E.T.S.I. Montes. U.P.M. Madrid.
- CEDEX (1991) *Curso sobre modelos hidrológicos de simulación continua de la cuenca* Gabinete de Formación y Documentación. M.O.P.U. Madrid.
- Chow V.T., Maidment D.R., Mays L.W. (1988) *Applied Hydrology*, 572 pp., Mc.Graw-Hill Co.
- Church J.E. (1941) *The Melting of Snow Proceedings, Central Snow Conference*. Vol. 1, Diciembre. pp. 21-32
- Crawford N.H. y Linsley R.K. (1962) *The synthesis of continuous streamflow hydrograph on a digital computer* Stanford University Department of Civil Engineering. Tech. Report 12.
- Crawford N.H. y Linsley R.K. (1966) *Conceptual model of the hydrological cycle* Publ. N° 62 Bull IASH 62.
- De Simon Navarrete E., Mintegui Aguirre J.A, Garcia Rodriguez J.L. y Robredo Sanchez J.C. (1993) *La restauración hidrológico-forestal en las cuencas hidrográficas de la vertiente mediterránea* 325 pp. Información Técnica N° 22/93. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía.
- Dirección General del Medio Ambiente (1985) *Metodología para la evaluación de la erosión hídrica*. 150 pp. Serie Documentación del M.O.P.U. Madrid.
- Dirección General de Obras Hidráulicas (1974/82) *AFOROS. 9, Cuenca del Duero* Períodos 1974-75 a 1981-82. M.O.P.U. Madrid.
- Donigian A.S., Imhoff J.C., Bicknell B.R. y Kittle J.L. (1982) *Guide to the application of the hydrological simulation program-fortran (HSPF)* 150 pp. Environmental research laboratory, EPA.
- Einstein H.A. y Shen H.W. (1964) *A study of meandering in straight alluvial channels J. Geophys. Res.* 69, pp. 5239-5247.
- Emmett W.W. (1969) *The hydraulics of overland flow on hillslopes* 68 pp. Geological Survey Professional Paper 662-A.
- Foster G.R., Lane L.J., Nowlin J.D., Laflen J.M. y Young R.A. (1981) *Estimating erosion and sediment yield on field-sized areas Actas Am. Soc. Agríc. Engrs.* N° 24, pp. 1253-1262.
- Gandullo J.M. (1984) *Ecología Vegetal* 208 pp. Fundación Conde del Valle Salazar. E.T.S.I. Montes. Madrid.

- García Nájera J.M. (1943) (2ª edición 1962) Principios de Hidráulica Torrencial y sus aplicaciones a la corrección de torrentes. 297 pp., I.F.I.E. Madrid.
- Horton R.E. (1939) Analysis of runoff-plat experiment with varying infiltration-capacity Actas Am. Geophys. Union. Vol. 20, pp. 693-711.
- Horton R.E. (1940) An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity, Proc. Soil Sci. Soc. Am. Vol. 5, pp. 399-417.
- Hubbert M.K. (1956) Darcy's law and the field equations of the flow of underground fluids, Trans. Am. Inst. Mining Met. Engrs. Vol. 207, pp. 222-239.
- IRYDA (1985) Diseño y construcción de pequeños embalses (197 pp., Serie de Ingeniería Rural y Desarrollo Agrario.- Manual Técnico núm. 2. - M.A.P.A.
- Knisel W.G. (1980) A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems 643 pp. USDA Conservation Research Report N° 26.
- Linsley R.K. (Jr.), Kohler M.A. y Paulhus J.L.H. (1958) (2ª edición 1977) Hidrología para ingenieros 386 pp. Ed. Mc Graw-Hill Latinoamericana S.A. Bogotá.
- López Cadenas de Llano F., Blanco Criado M. (1968) Aspectos cualitativos y cuantitativos de la erosión hídrica y del transporte y depósito de materiales. 187 pp., I.F.I.E. Madrid.
- López Cadenas de Llano F., Mintegui Aguirre J.A. y Perez-Soba Baro A. (1984) Metodología integrada para la determinación de los sedimentos aportados por una cuenca, 17 pp., Simposium sobre investigación en pequeñas cuencas FAO-IUFRO. Torremolinos España.
- López Unzu F. (1989) Distribución o integración en el modelado matemático de la hidrología torrencial 291 pp. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Forestal. E.T.S.I. Montes. U.P.M. Madrid.
- Meyer L.D. y Wischmeier W.H. (1969) Mathematical Simulation of the Process of Soil Erosion by Water Actas de la American Society Agronomic Engineers A.S.A.E. Michigan, pp. 754-758.
- Meyer-Peter E. y Müller R. (1948) Formulas for Bed Load Transport, Report on Second Meeting of International Association of Hydraulic Research. Estocolmo, Suecia. pp. 39-64.
- Mintegui Aguirre J.A. (1988) Evolución de los modelos de estimación de la erosión hídrica y su incidencia en los proyectos de restauración hidrológico-forestal, 17 pp. Seminario sobre erosión: evaluación y actuaciones para su control. CEDEX-MOPU. Madrid.
- Mintegui Aguirre J.A. y López Unzu F. (1990) La Ordenación agrohidrológica en la planificación. 306 pp., Servicio de Publicaciones del Gobierno Vasco. Vitoria.
- Mintegui Aguirre J.A. (1991) El papel del bosque de montaña: Aspectos técnicos, Actas del X Congreso Forestal Mundial (Paris). Editado por la Revue Forestiere Francaise, Hors Serie, núm. 3. Francia.
- Mintegui Aguirre J.A. y Robredo Sánchez J.C. (1993) Métodos para la estimación de los efectos torrenciales en una cuenca hidrográfica. Manual para un programa básico. 88 pp. Fundación Conde del Valle de Salazar. E.T.S.I. Montes. Madrid.
- Onstad C.A. y Foster G.R. (1975) Erosion Modeling on a Water-shed, Actas de la American Society Agronomic Engineers A.S.A.E. Michigan, pp. 288-292.
- Ponce V.M. (1989) Engineering hydrology. Principles and practices. 640 pp. Prentice Hall. New Jersey.
- Robredo Sánchez J.C. (1994) Modelo para la ordenación de cuencas hidrográficas torrenciales, encaminado a la planificación de los trabajos y obras de restauración hidrológico-forestal, Tesis Doctoral. 368 pp., Anexos, Fotografías y Mapas, E.T.S.I. Montes, U.P. Madrid.
- Smart G.M. y Jaeggi M.N.R. (1983) Sediment Transport on Steep Slopes. 191 pp., Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie. Zürich.
- Témez J.R. (1987) Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. 124 pp. M.O.P.U. Madrid.
- Thiery E. (1891) (2ª edición 1914) Restauration des montagnes, correction des torrents et reboisement 480 pp., Librairie Polytechnique Ch. Beranger. Paris et Liege.
- Thiessen A.H. (1911) Precipitation for large areas Monthly Weather Rev. Vol. 39, pp. 1082-1084. Julio.
- Thornthwaite C.W. y Mather J.R. (1955) The water balance, Publ. Climatol. Lab. Climatol. Drexel. Inst. Technol. 8(1) 1-104.
- U.S. Army Corps of Engineers (1960) Runoff From Snowmelt Engineering and Desing Manuals. EM 1110-2-1406, Enero.
- U.S. Army Corps of Engineers (1981) HEC-1. Flood hydrograph package. Users manual. Water Resources Support Center. Hidrologic Engineering Center. 723-x6-12010.
- U.S.D.A. Soil Conservation Service (1985) SCS National Engineering Handbook. Washington D.C.
- Wischmeier W.H. y Smith D.D. (1978) Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. 58 pp., U.S.D.A., Agriculture Handbook n°537. Washington D.C.