

CARACTERIZACION DE LAS CUENCAS HIDROGRAFICAS, OBJETO DE RESTAURACION HIDROLOGICO- FORESTAL, MEDIANTE MODELOS HIDROLOGICOS.

Juan Angel Mintegui Aguirre, José Carlos Robredo Sánchez

Unidad de Hidráulica e Hidrología. Departamento de Ingeniería Forestal

E.T.S. Ingenieros de Montes

Universidad Politécnica de Madrid

RESUMEN: El presente artículo pretende reflejar la importancia que tiene una correcta utilización de los modelos hidrológicos, en el diagnóstico de la situación real de las cuencas hidrográficas sometidas a fenómenos torrenciales y con problemas para mantener y/o recuperar sus coberturas vegetales; tan necesarias para asegurar el equilibrio dinámico de dichas cuencas.

El análisis del geodinamismo torrencial (con frecuencia realizado a través de modelos hidrológicos integrados) y la necesidad de proteger y al mismo tiempo utilizar adecuadamente los recursos hídricos y edáficos de una cuenca, basándose en el mantenimiento de una extensión apropiada de las cubiertas vegetales permanentes en la misma (bosques, matorrales y pastizales) y de manera especial en su cabecera, son dos aspectos fundamentales para asegurarse el equilibrio dinámico de la cuenca y su aprovechamiento sostenido. Ambos se pueden estudiar conjuntamente a través de modelos hidrológicos distribuidos espacio-temporales; que permiten una exhaustiva ordenación agrohidrológica de una cuenca, sobre todo cuando se trata de abordar en ella un proyecto de restauración hidrológico-forestal.

ANTECEDENTES: ANALISIS DEL PROBLEMA DE LA TORRENCIALIDAD EN LAS AREAS DE MONTAÑA.

Los orígenes de los proyectos de restauración hidrológico-forestal o de corrección de torrentes, como también han sido denominados en el pasado, están íntimamente ligados con la necesidad de restaurar las montañas; que por su posición geográfica, constituyen las cabeceras de las principales cuencas hidrográficas.

En las montañas las precipitaciones son más abundantes, pues a las de carácter ciclónico y convectivo hay que añadir las de origen orográfico; además, en ellas los fenómenos torrenciales se desencadenan con mayor intensidad, transmitiéndose a posteriori aguas abajo hacia las áreas dominadas y extendiéndose en definitiva por toda la cuenca hidrográfica.

La cubierta vegetal, fundamentalmente el bosque de montaña, representa un factor estabilizador de la cuenca ante los mecanismos torrenciales; pues contribuye tanto incrementar la infiltración, ya que la vegetación aumenta la porosidad del suelo; como a

disminuir la velocidad de la lámina de escurrido superficial, pues incrementa la rugosidad de la superficie por la que circula y, por último, favorece el flujo sub-superficial del agua en los períodos de precipitaciones abundantes. En síntesis, el tapiz vegetal es un regulador natural de los recursos hídricos.

A los aspectos indicados, hay que añadir que representa también un instrumento de defensa, de primer orden, contra los fenómenos erosivos. Tanto de los procedentes del impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo, pues la vegetación actúa de colchón protector de este último; como de los derivados del arrastre de las partículas disgregadas por los flujos de escorrentía, pues, como se ha indicado, interviene en la generación de dichos flujos.

A finales del siglo pasado, las principales cadenas montañosas de nuestro viejo continente se encontraban seriamente deforestadas, por lo que los efectos catastróficos de los procesos geo-torrenciales, a los que en ocasiones se añadían los derivados por los desprendimientos de aludes, estaban bastante generalizados. Ante esta circunstancia, los parlamentos nacionales de

los países afectados, promulgaron normas para llevar a cabo lo que entonces se denominó la "restauración de montañas", que con el tiempo ha dado lugar a los actuales "proyectos de restauración hidrológico-forestal".

De esta forma Suiza (1848), Francia (1882), o Austria (1884), ajustaron su legislación específica en la materia que nos ocupa. En lo que respecta a nuestro país, el Real Decreto de 3 de febrero de 1888 hace referencia a la organización de los trabajos de repoblación en las cabeceras de las cuencas hidrográficas de España y otro Real Decreto de 7 de junio de 1901 creó los Servicios Hidrológico-Forestales, a los que hoy se deben extensas zonas arboladas de nuestra península.

Los ingenieros pioneros en la restauración de montañas, resumían sus experiencias con la siguiente frase: "No se puede corregir un torrente, si previamente no se ha restaurado su cuenca alimentadora".

Después de haber recorrido casi todo el siglo XX (lo que para los restauradores de montañas no representa un tiempo excesivamente largo, pues prácticamente es coincidente con el tumo de las principales especies arbóreas de crecimiento lento y con los períodos de retomo de los eventos torrenciales más intensos, causantes de las avenidas que ponen de manifiesto el efecto de las medidas adoptadas), se mantiene inalterable dicha sentencia. Pero si el fondo de la cuestión es invariable, pues tanto la ecuación de continuidad como la de la conservación de la energía resultan leyes indiscutibles; si se han modificado las formas.

Las cuencas hidrográficas objeto de restauración hidrológico-forestal, analizadas en la actualidad, son de mayor extensión y la utilización del territorio ha sufrido notables modificaciones, debido en gran parte a los cambios en la forma de vida de la sociedad; por tanto, lo que hace cien años se resolvía prácticamente aplicando la repoblación forestal a extensas áreas degradadas, que supuestamente (de acuerdo con los conocimientos empíricos de la época) se creían que era posible recuperarlos; hoy se plantea una ordenación agrohidrológica previa de la cuenca, antes de abordar las obras y trabajos de restauración hidrológico-forestal que se necesitan para su corrección.

Por tal motivo, los criterios utilizados para plantear la ordenación agrohidrológica, o una planificación subsidiaria, han ido variando en el transcurso del tiempo.

Centrándose en España, que constituye el marco específico de este análisis, hasta la década de los sesenta se establecían como zonas prioritarias para

llevar a cabo en ellas los proyectos de restauración, las áreas afectadas intensamente por la erosión hídrica; obviando en la práctica otros aspectos asimismo importantes de la torrencialidad. Como modelo de la época se recuerda a los "índices de protección del suelo por la vegetación" (F. López Cadenas de Llano, M. Blanco Criado, 1968, basados en los estudios anteriores sobre la "pendiente máxima admisible en cultivos y pastizales" de J.M. García Nájera, 1954).

Manteniendo el mismo objetivo, en la década siguiente tiene lugar la introducción y extensión del modelo U.S.L.E.; labor en la que el antiguo departamento de Hidráulica e Hidrología de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes (dirigido por F. López Cadenas de Llano) realizó una gran aportación. Por otro lado, el I.C.O.N.A. a partir de 1979 promueve el Proyecto LUCDEME (aprobado por Orden de 5-X-1981), y a su amparo se realizan importantes estudios como la "Determinación del factor lluvia, coeficiente R ó índice de erosión pluvial de la U.S.L.E. en la vertiente mediterránea española" (1980), aplicable a 182.000 Km² de nuestra península y "Agresividad de la lluvia en España" (1988), que extiende y generaliza el valor del factor R a todo el territorio nacional. Finalmente, como resultado de éstos y otros estudios, se han elaborado los "Mapas de estados erosivos" (1987-93), que apoyándose en el citado modelo, reflejan la erosión potencial en las diferentes áreas de España. Dichos conceptos han permitido concretar los primeros esquemas con los "Criterios para la Ordenación Agrohidrológica de una cuenca alimentadora" (1990, 1993).

Pero en la década de los ochenta, se plantea una nueva línea para el análisis de las cuencas hidrográficas; que se inicia con la "Metodología integrada para la determinación de los sedimentos aportados por una cuenca" (1984-85), elaborada también por el departamento antes mencionado.

Dicha metodología conjuga armónicamente los modelos U.S.L.E. (estimación de la erosión) y M.U.S.L.E. (emisión de sedimentos) con el modelo hidrológico H.Y.M.O. y la ecuación de transporte de los sedimentos en suspensión de J.R. Williams (1975); en síntesis, el esquema general de la "Metodología" se expone en la Figura 1. Con ella se dio entrada a los modelos hidrológicos integrados, en la ordenación agrohidrológica de las cuencas hidrográficas objeto de restauración, aspecto en el que se volverá a insistir más adelante.

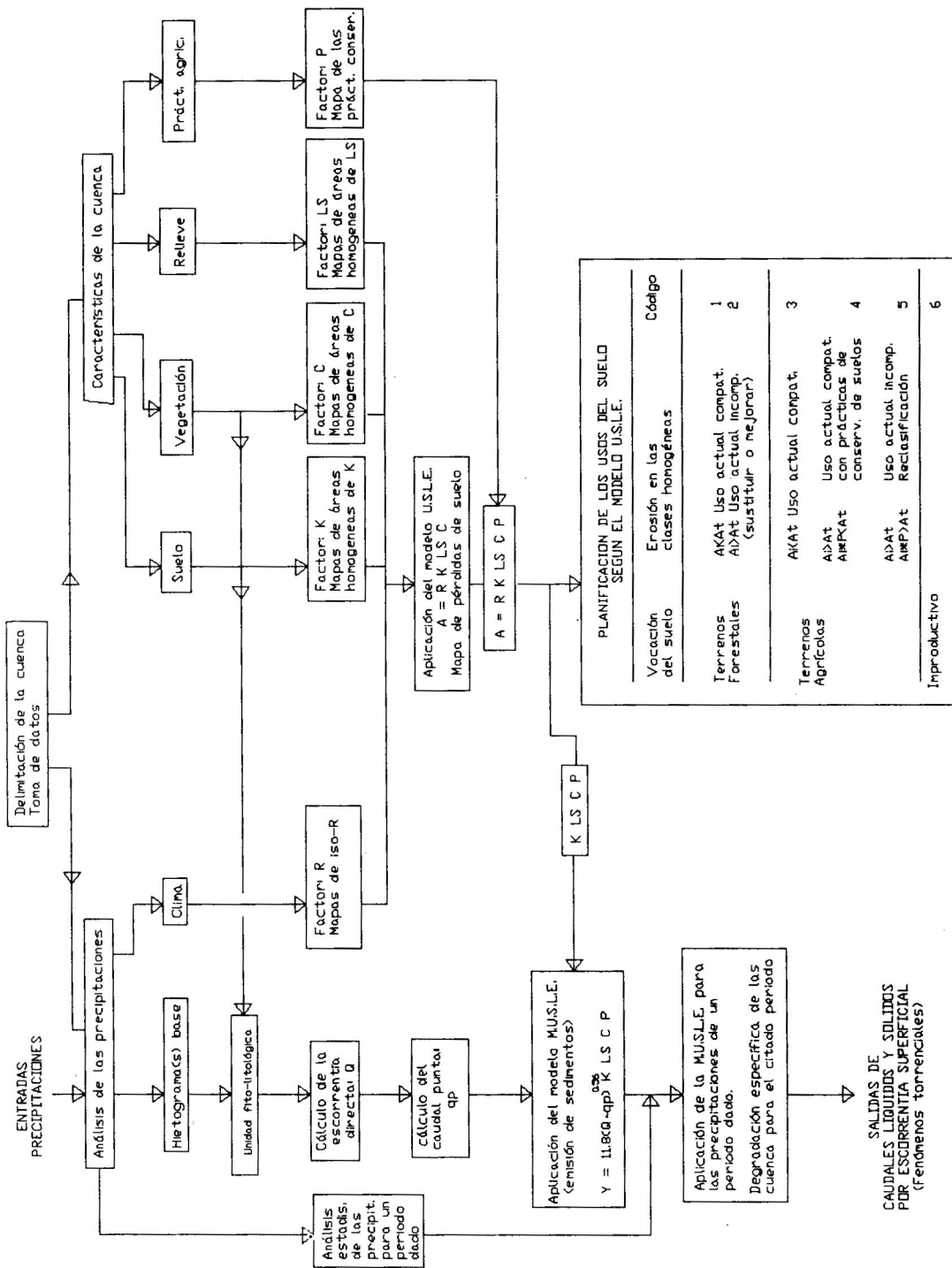


Figura 1

OBJETIVOS DE LA RESTAURACION HIDROLOGICOFORRESTAL DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA DE CARACTER TORRENCIAL.

Los objetivos generales de la ordenación agrohidrológica de una cuenca hidrográfica y de su posterior restauración hidrológico-forestal se centran en el uso racional de los recursos que dispone, fundamentalmente el suelo y el agua. De todos modos, es frecuente desglosarlos en los siguientes:

- I La retención del suelo mediante el control de la erosión, tratando al mismo tiempo de aprovechar este recurso.
- I La regulación de las avenidas y del transporte de materiales provocado por las mismas, así como la sedimentación de estos últimos en las áreas dominadas.
- I La provisión hídrica.

Como consecuencia de todos ellos, la planificación dinámica de las cuencas hidrográficas.

Estos objetivos se dividen para su estudio en dos grandes grupos: por un lado, los relacionados con los problemas generados por los eventos torrenciales en la cuenca; por otro, los referentes a la utilización agronómica de la misma y el aprovechamiento racional de los recursos hídricos y las potencialidades vegetativas en las diferentes zonas de la cuenca.

El primero está asociado con la generación de los caudales de avenida y el consiguiente desencadenamiento de todo el mecanismo del fenómeno torrencial (erosión en la cuenca, transporte de los materiales por los cauces efluentes y depósito de los mismos en las áreas dominadas).

Lógicamente, incluye tanto la protección del suelo (tratando básicamente de controlar la erosión), como la regulación de la lámina de escurrido y, por supuesto, de la avenida propiamente dicha, una vez que el flujo se concentra en los cauces efluentes. En el esquema de la Figura 2 se refleja, en su lado izquierdo y en la parte central del mismo, los pasos seguidos para analizar la fenomenología torrencial; mientras que en el lado derecho se mencionan los objetivos específicos, que encajan plenamente dentro de la planificación agrohidrológica de una cuenca vertiente. Se refiere a los siguientes:

- 1) El mapa de estados erosivos de la cuenca hidrográfica y el mapa de ordenación de los usos del suelo en la misma, según el modelo U.S.L.E.

- 2) La degradación específica de la cuenca vertiente (es decir, la emisión de sedimentos fuera de la cuenca para un año medio por unidad de superficie de ésta), en t / ha-año.
- 3) La formación de las pendientes de compensación (ó de equilibrio) en los cursos torrenciales.
- 4) La determinación, fundamentalmente cartográfica, de las zonas de inundación en las áreas dominadas y el consiguiente esquema de protección de las mismas.

Estos objetivos se abordan en la actualidad con modelos ó metodologías integradas, pero sus esquemas se pueden adaptar a una metodología distribuida, sin perder su eficiencia actual y extendiendo su campo de aplicación al análisis de la utilización agronómica de la cuenca, en relación con el aprovechamiento en la misma de los recursos agua y suelo.

Los objetivos del segundo grupo se definen esquemáticamente en la Figura 3, que presenta una estructura similar a una pseudo-matriz de doble entrada, donde en las filas aparecen los objetivos generales (que se mantienen los mismos que en la Figura 2) y en las columnas el análisis termo-pluviométrico de la cuenca, utilizando como factores determinantes el módulo pluviométrico P y la evapotranspiración potencial ETP en la misma, para los intervalos de tiempo que se consideren apropiados, en las simulaciones que se necesiten realizar.

La definición ó delimitación de dicho intervalo de tiempo, resulta una cuestión de gran importancia; pues lo que se pretende simular en el contexto de este segundo grupo de objetivos, supera el ámbito de los eventos torrenciales, para adentrarse en el análisis del comportamiento de la cuenca ante todo tipo de acciones climáticas, incluidas las derivadas de la temperatura ambiente. Por tanto, mientras los fenómenos torrenciales se limitan a una duración de unas horas ó a lo sumo a dos ó tres días, hasta que el efecto de la avenida se disipe; siendo necesario establecer intervalos de corta duración (minutos) para realizar la simulación de tales efectos en la cuenca. Las cubiertas vegetales permanentes necesitan ser analizadas a lo largo de todo el año hidrológico, e incluso a lo largo de períodos mucho más amplios, que permitan conocer la evolución de dichos estratos vegetales durante sus diferentes etapas de crecimiento; por lo que los intervalos de simulación deben ser más dilatados (días e incluso meses).

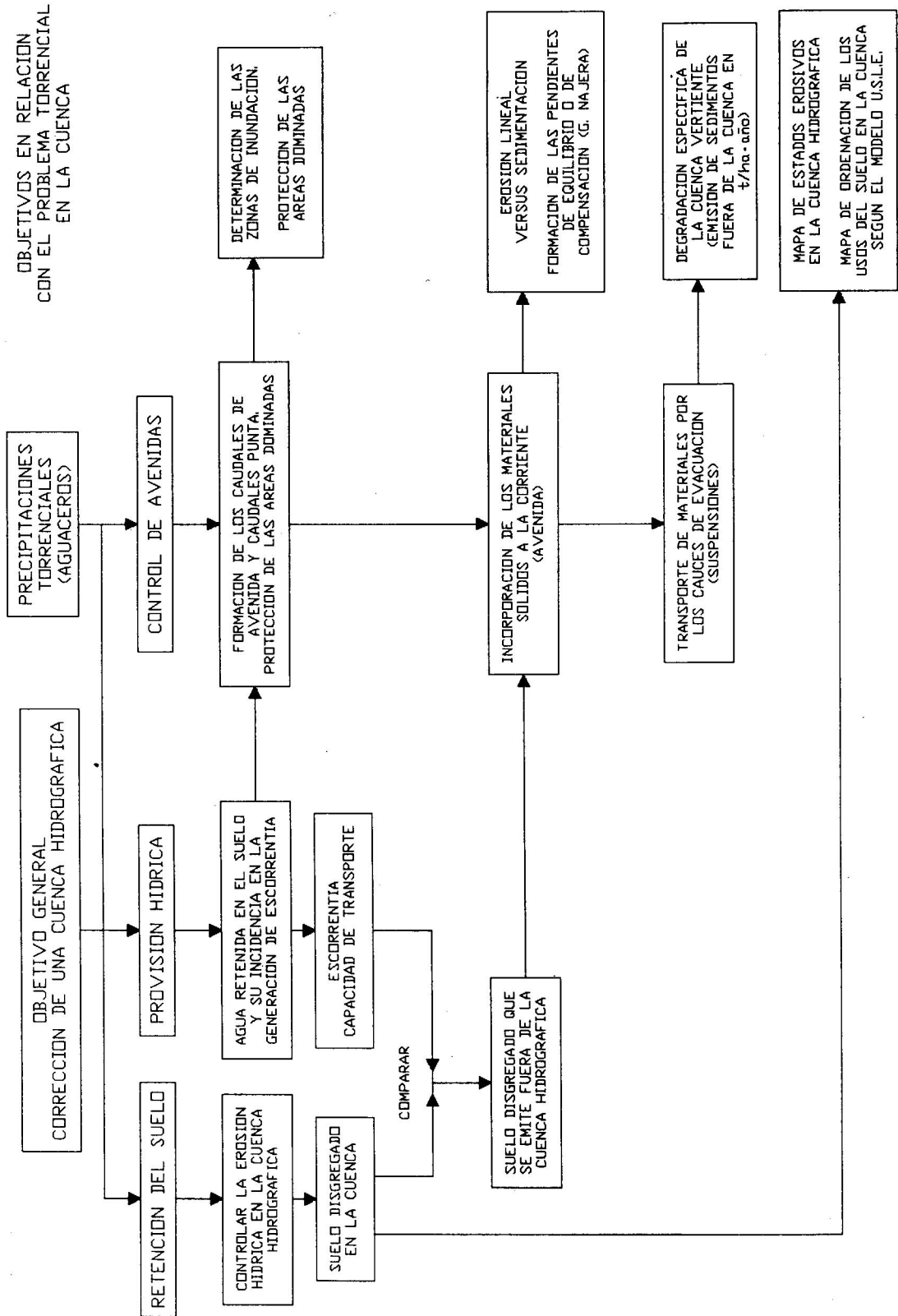


Figura 2

Por otro lado, el estudio de la estabilidad de las masas vegetales, fundamentalmente el bosque, que constituye el factor restaurador de la cuenca por excelencia; plantea el consiguiente cálculo de los balances hídricos en la cuenca y como resultado de esta situación, exige que la estructura del "modelo", a utilizar, se ajuste al funcionamiento del ciclo hidrológico; al menos en sus principales aspectos. En consecuencia, se requiere tener presente dos aspectos: uno de ellos parcialmente asumido al comentar la torrencialidad y el otro no contemplado hasta el momento. Estos son:

- El comportamiento del agua en el suelo
- El retomo del agua a la atmósfera

En los modelos hidrológicos integrados comúnmente utilizados en la simulación de los fenómenos torrenciales (tales como el HEC-1 ó el HYMO, por poner dos ejemplos de sobra conocidos), se prescinde del cálculo de la evapotranspiración en la cuenca (pues la finalidad que se persigue con los mismos no lo hace necesario); pero este factor no es posible obviarlo, cuando el objetivo que se aborda es el comportamiento dinámico de la cuenca, en relación con su cubierta vegetal protectora, a lo largo del tiempo de evolución de ésta.

Resumiendo, a los cuatro objetivos mencionados al analizar la torrencialidad, se añaden a continuación los dos siguientes, relacionados con la correcta utilización agrohidrológica de la cuenca:

- 5) El mantenimiento y/o implantación de una cobertura arbolada en las cabeceras ó áreas dominantes de la cuenca, si las condiciones climáticas y edáficas lo permiten. Normalmente cuando: $P > ETP$, no se presentan problemas para establecer ó mantener el bosque, salvo en zonas especiales tales como: superficies de litosuelos, macizos rocosos, etc.
- 6) Por el contrario, cuando: $P < ETP$, es preciso analizar las capacidades bioclimáticas en las diferentes zonas de la cuenca, a fin de establecer la vegetación protectora contra la erosión, que al mismo tiempo contribuye en la regulación de la lámina de escurrido.

La integración de ambos tipos de objetivos (expuestos en las Figuras 2 y 3), exige plantear una "metodología" conjunta, cuyo diagrama de flujo se adjunta en la Figura 4. Con ella se intenta definir el fenómeno global de la circulación general del agua, particularizada para una cuenca hidrográfica concreta.

Más adelante se argumentará la conveniencia, o más bien la necesidad, que presenta una "metodología" de estas características, de adoptar una estructura de tipo distribuido (espacial y temporalmente) para cumplir con tales objetivos.

LA UTILIZACION DE LOS MODELOS HIDROLOGICOS INTEGRADOS EN LA ORDENACION AGROHIDROLOGICA DE UNA CUENCA OBJETO DE RESTAURACION.

Centrándose nuevamente en la "Metodología integrada para la determinación de los sedimentos aportados por una cuenca"; a partir de 1990 se ha modificado en parte, sustituyendo la función de conducción del modelo **H.Y.M.O.** por la ecuación de Muskingum, e introduciendo en el programa el transporte de los materiales de fondo, constituido básicamente por los arrastres. Para este nuevo término se ha utilizado la fórmula de **G.R. Smart y M.N.R. Jaeggi (1983)**.

Para facilitar el desarrollo de los modelos hidrológicos incorporados en la "Metodología", la Unidad de Hidráulica e Hidrología de la **E.T.S.I.** de Montes ha elaborado un programa informático, el **CAUDAL3 (1993)** y para representar cartográficamente los mapas de "estados erosivos" y de "ordenación de los usos del suelo según el modelo **U.S.L.E.**", se vienen utilizando sistemas de información geográfica del tipo **GENAMAP, ARC-INFO**, etc.

En realidad, la "Metodología" incorpora un modelo hidrológico integrado, dentro de la anterior estructura de los modelos cartográficos de estimación de la erosión (Mapas de estados erosivos).

En los modelos "integrados" los parámetros que definen la cuenca se representan por los valores medios de la misma, y los resultados obtenidos se dan para un punto o sección concreta preestablecida. En realidad la "Metodología" en cuestión es integrada en su parte esencial, pues se apoya en un modelo hidrológico de este tipo, pero sus aspectos cartográficos presentan un cierto grado de distribución espacial, en lo que se refiere a la estimación de los diferentes niveles de erosión superficial (mediante modelos paramétricos) en las distintas zonas homogéneas de la cuenca estudiada.

La "Metodología" se aplica a las cuencas hidrográficas, como un instrumento para plantear su ordenación agrohidrológica; asimismo desarrolla, como se puede apreciar, todos los objetivos específicos recogidos en la Figura 2.

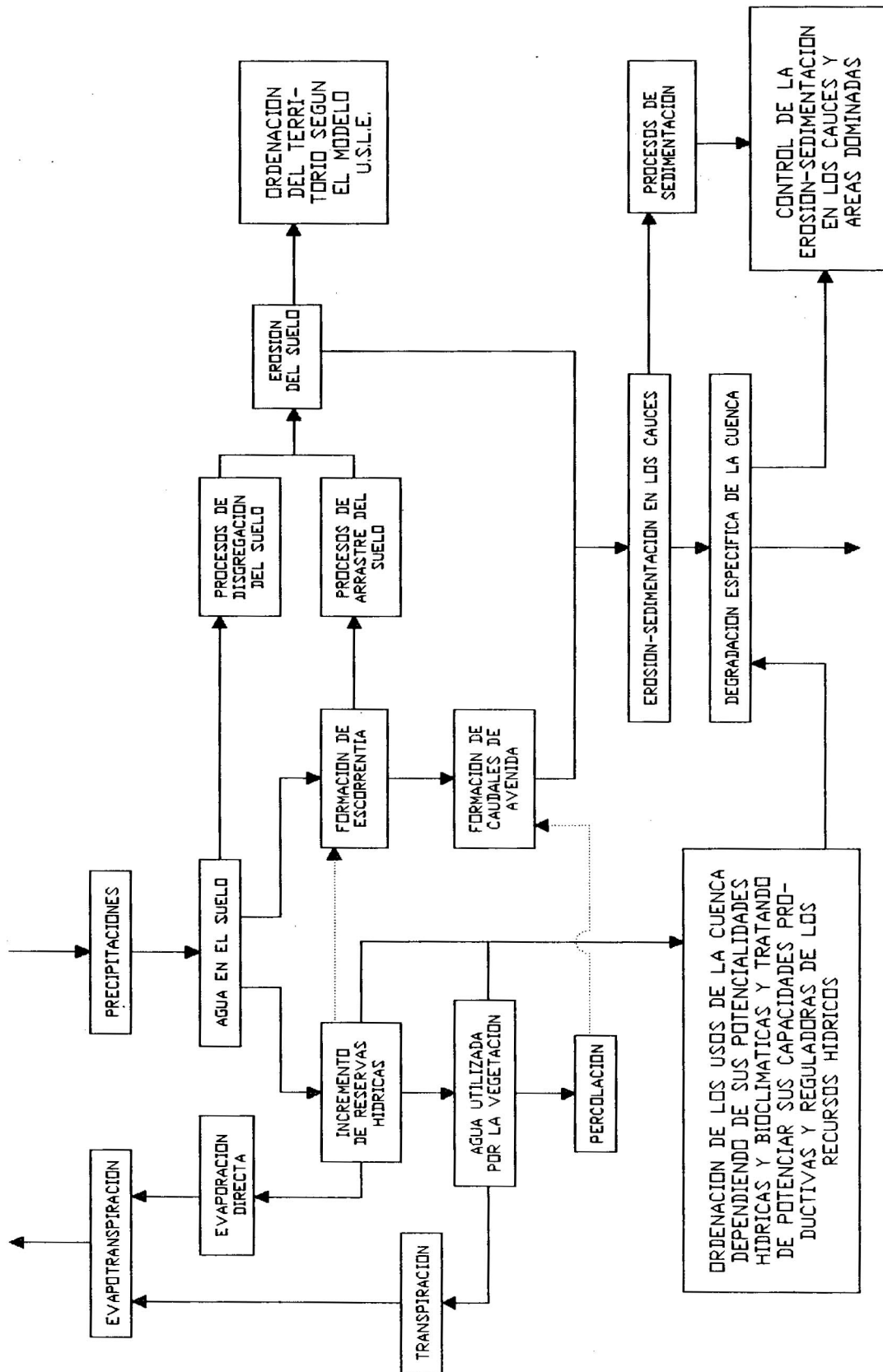


Figura 3.

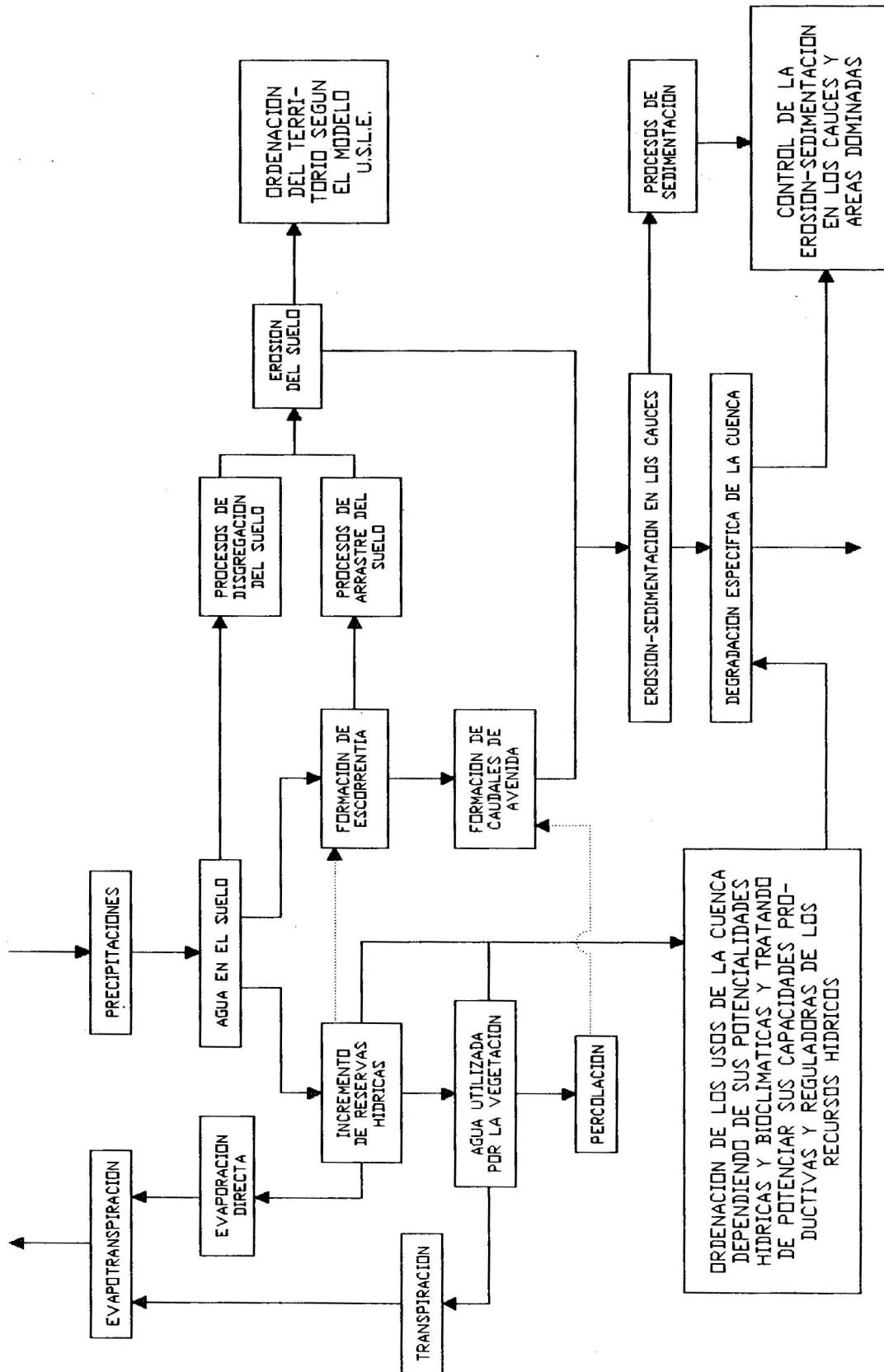


Figura 4.

A propósito de esta cualidad y dado que los fenómenos hidrológicos que se presentan en la cuenca se expresan mediante ecuaciones, que posteriormente se desarrollan numérica y cartográficamente en la misma; conviene tener presente que en la práctica las únicas universalmente aceptadas se reducen a la Ley de Darcy y a las Ecuaciones de Saint Venant (ecuación de la "continuidad" y ecuación de la "dinámica", pudiendo esta última reducirse en ocasiones a la "onda cinemática"). El resto son trabajos de investigación que se adoptan de una forma particular en cada circunstancia concreta.

Lógicamente, la estructuración de la "metodología" requiere una labor previa de redefinición de los conceptos y adopción de los parámetros básicos que van a configurarlo. El objetivo final se mantiene el mismo, la aportación de unos criterios válidos para una buena ordenación agrohidrológica de las cuencas necesitadas de restauración; criterios que han de responder al mayor número posible de los interrogantes que se presenten a la hora de realizar dicha ordenación. Con todo, los dos tipos de problemas principales siguen siendo los de siempre:

- 1) Controlar las consecuencias que se derivan del geodinamismo torrencial, cuando tienen lugar eventos torrenciales, sobre todo si son extraordinarios.
- 2) Resolver los problemas derivados de las disponibilidades hídricas en las diferentes zonas de la cuenca a lo largo del año medio, así como sus posibles desviaciones respecto al mismo.

El primero se ha configurado con el nombre genérico de "la torrencialidad" (Figura 2); mientras que el segundo se puede integrar bajo la denominación más general de "el comportamiento hidrológico de la cuenca en el período comprendido entre eventos torrenciales" y se corresponde con la Figura 3.

En relación con "la torrencialidad", tradicionalmente analizado mediante modelos o metodologías integradas, cabe señalar que los modelos distribuidos abordan perfectamente los mismos objetivos, pero modificando su procedimiento para adaptarse a su propia configuración.

En cuanto a la extensión del "modelado hidrológico al período comprendido entre eventos torrenciales", su aspecto esencial, el referente a la evaluación de las disponibilidades hídricas en cada zona concreta de la cuenca que se analiza a lo largo del tiempo, obliga a considerar, además de los eventos torrenciales, todas

las precipitaciones "normales" (es decir, las no torrenciales), así como el comportamiento del agua en el suelo y el retomo del agua a la atmósfera; adaptándose todo el esquema operativo al ciclo hidrológico y a una disposición espacio-temporal propia del modelado distribuido.

Con esta estructura se puede analizar tanto un año medio, como el efecto de las posibles variaciones estacionales a lo largo de un período de varios años. En este último caso, cabe la posibilidad que se trate de años de gran pluviosidad o, por el contrario, se refiera a años en los que se presenta la sequía; en ambos casos es conveniente estudiar sus efectos.

Cuando se estudian cuencas de montaña, tampoco se debe olvidar el aspecto relativo al comportamiento hidrológico del manto de nieve, centrado en su fusión. Para ello, siguiendo un criterio fundamentalmente práctico y universalmente aceptado, se utiliza el procedimiento de "grado-día". Es fácil comprender que en nuestro país sus resultados están aún lejos de ser satisfactorios, ante la evidente falta de información al respecto, pero es de esperar que la situación vaya cambiando.

En síntesis, la "metodología distribuida", capaz de abordar los dos tipos de problemas básicos antes citados y presentes en todo proyecto de restauración hidrológico-forestal, implica:

- 1) Incluir en su esquema el comportamiento del ciclo hidrológico completo (aunque sea de la forma más sencilla posible).

Esta condición es consecuencia de incorporar en la misma tanto las precipitaciones (entradas al sistema), como las evaporaciones directas y evapotranspiraciones (salidas del sistema), a lo largo de todo el período en que se realiza su aplicación.

- 2) Adaptarse a una estructura distribuida, tanto en el espacio como en el tiempo.

En el espacio, por que las disponibilidades de agua deben estimarse allí donde se encuentren y en la forma en que se encuentren (agua superficial, sub-superficial ó subterránea, e indicando su dependencia con el medio y con la dinámica del ciclo hidrológico en la cuenca).

En el tiempo, reflejando las variaciones de forma continua a lo largo del período considerado; bien utilizando intervalos cortos (minutos) cuando se

analizan eventos "torrenciales", o más prolongados (días) si se trata de estudiar fenómenos "normales" ó "no torrenciales".

En otras palabras, una "metodología distribuida" debe reflejar el efecto del ciclo hidrológico en cada zona concreta de la cuenca que se analiza. Es decir, debe operar como "si se dividiera la cuenca en celdas y a cada una de ellas se aplica el ciclo hidrológico completo, sin olvidarse a posteriori de correlacionar lógicamente, de acuerdo con las leyes de la circulación del flujo, las repercusiones existentes entre cada celda y todas las que le rodean".

Lo dicho, condiciona a referirse en un marco geográfico apropiado para ubicar tales zonas; consecuentemente, la mejor forma de abordar el problema, es utilizando un Sistema de Información Geográfico adecuado.

Para finalizar con este análisis, comparando los modelos hidráulicos e hidrológicos que integran el programa informático CAUDAL3, que constituye una estructura eminentemente integrada, con una "metodología distribuida" realizada "ad hoc" para simular los dos tipos de objetivos anteriormente definidos como básicos en un proyecto de restauración hidrológico-forestal; las peculiaridades de cada tipo de esquema de cálculo (integrado o distribuido) se pueden apreciar en la Tabla 1 adjunta.

CONCLUSIONES

A lo largo de este artículo se han indicado los objetivos que debe abordar un proyecto de restauración hidrológico-forestal de una cuenca hidrográfica y de qué maneras se puede plantear su resolución.

Dichos objetivos inciden de una forma diferenciada dentro del espacio geográfico que constituye la cuenca vertiente, que se complementa con la manera de presentarse en los cauces efluentes. Así mientras la "retención del suelo" y la "mejora de los aprovechamientos hídricos" están íntimamente relacionados con el comportamiento de la propia cuenca hidrográfica objeto de restauración; el último junto con el "control de las avenidas" repercute directamente en la formación de los caudales líquidos causantes de las avenidas, que normalmente son consecuencia de las precipitaciones torrenciales.

En la Figura 5 se representa el esquema restaurador de un "proyecto hidrológico-forestal". En él se pueden diferenciar los aspectos anteriormente indicados, al

tiempo que se precisan los factores que deben contemplarse para rehabilitar la cuenca hidrográfica. Estos factores son básicamente los relativos al relieve, los de tipo selvícola y los de carácter hidrológico (tanto los que tienen relación directa con la generación de los caudales de avenida, asociados normalmente con las precipitaciones torrenciales; como los vinculados con las necesidades hídricas de la cuenca, cuando se presentan períodos estacionales secos, en ocasiones prolongados).

La componente selvícola, base central de la restauración de la cuenca, exige analizar los parámetros climáticos, edáficos y fisiológicos. Por otro lado, se relaciona tanto a nivel de los objetivos como de las meras tecnologías operativas (maquinarias a utilizar en el terreno para la preparación de las repoblaciones), con la morfología y relieve de las diferentes zonas de la cuenca.

El estudio de la situación real de la cuenca, permite comprobar la influencia que las cubiertas vegetales, existentes en la misma, tienen en la regulación hídrica y en la protección del suelo frente a la erosión hídrica. En consecuencia, representan un estimador de las previsiones que deben esperarse con la incorporación de las nuevas coberturas vegetales permanentes (como es el caso de las repoblaciones). Esta relación de causalidad no se limita a la lámina de agua que discurre por la cuenca de recepción; sino que presenta su mejor exponente en las crecidas que se manifiestan en los cauces de evacuación.

Siguiendo con un esquema lógico, la operación previa a todo proyecto de "restauración hidrológico-forestal" es la "ordenación agrohidrológica" de la cuenca objeto del mismo. Con dicha ordenación se planifica tanto el uso al que deben dedicarse los diferentes terrenos que constituyen la cuenca vertiente, como los posibles enclaves en los que se deben ubicar las obras hidráulicas de corrección, en los cursos sujetos a los efectos del geodinamismo torrencial.

En función de los criterios establecidos con el análisis de la "ordenación agrohidrológica", se plantean las tecnologías adecuadas para llevar a cabo la restauración de la cuenca. Estas se fundamentan en las medidas selvícolas, las obras hidráulicas de corrección de los cauces torrenciales y finalmente, como un medio para poder realizar las actividades citadas, las técnicas auxiliares que constituyen la infraestructura del monte, constituida principalmente por los caminos forestales y los cortafuegos.

Tabla 1. Comparación, para los diferentes fenómenos analizados en una cuenca hidrográfica, de las ecuaciones utilizadas, su modo de empleo y la forma operativa de análisis de los mismos, según se realice con una "metodología " o "programa de cálculo" de tipo "integrado" o "distribuido".

METODOLOGIA INTEGRADA (tipo CAUDAL3)			METODOLOGIA DISTRIBUIDA ("ad hoc" para cumplir con los objetivos indicados en el texto)		
Fenómenos analizados	Ecuaciones y/o modelos utilizados	Forma de operar con los modelos	Fenómenos analizados	Ecuaciones y/o modelos utilizados	Forma de operar con los modelos
* Determinación de la escorrentía directa * Cálculo de caudales	* Método del NC del USDA Soil Conservation Service	* Se determina el caudal líquido de cálculo, que atraviesa la sección de salida de la cuenca (o unidad) hidrográfica, para diferentes tipos de precipitaciones (análisis de eventos torrenciales) y características de la cuenca receptora (morfológicas, edáficas y de usos del suelo o vegetación)	* Determinación de la escorrentía directa * Movimiento del agua en suelos porosos saturados	* Método del NC del USDA del Soil Conservation Service * Ecuación de Darcy	* Se divide la cuenca en celdas o unidades, teniendo en cuenta las características de éstas (morfológicas, edáficas y de uso del suelo o vegetación)
- Determinación del Hidrograma Unitario. - Definición del hidrograma de tormenta. - Definición del caudal punta.	* Método del hidrograma triangular del USDA Soil Conservation service - Convolución del hidrograma - Definición de la ordenada máxima		* Circulación del agua encauzada * Fusión de la nieve * Evapotranspiración potencial * Evapotranspiración real	* Fórmula de Manning * Ecuación gradodía * Fórmula de Thornthwaite * Fórmula de Thornthwaite y Mather	* En función de las precipitaciones que inciden en ellas, se establece el ciclo hidrológico en las mismas * Además, hay que correlacionar lógicamente, según las leyes de circulación el flujo, las repercusiones existentes entre cada celda y todas las que le rodean
* Laminación de cauces	* Método de Muskingum	* Se analiza también el tránsito de los caudales líquidos por los diferentes tramos del cauce			
* Laminación de embalses	* Método de Puls				
* Emisión de sedimentos (en suspensión)	* Modelo M.U.S.L.E	* Calcula la emisión de los sedimentos en la sección de salida de la cuenca (o unidad) hidrográfica dada y su transporte por la avenida	* Estimación de la erosión superficial	* Modelo U.S.L.E	* Se aplica el modelo USLE directamente en cada celda
* Desplazamiento de los sedimentos en suspensión	* Ecuación de transporte de J.R. Williams		* Formación de los caudales sólidos		
* Cálculo de calados	* Fórmula de Manning		- Elementos finos (suspensiones)	* Ecuación "ad hoc" (con un criterio similar al que adopta el modelo CREAMS)	* La emisión de sedimentos por cada celda se evalúa siguiendo un análisis que contempla:
* Cálculo de los acarrees (transporte de fondo)	* Ecuación de Smart y Jaeggi	* La erosión superficial en la cuenca se estima con la USLE, de forma independiente del modelo integrado descrito	* Elementos gruesos (acarrees o transporte de fondo)	* Ecuación de Smart y Jaeggi	a) La disgregación del suelo en cada una de ellas b) la capacidad de transporte del flujo que las atraviesa

Cualquiera de los dos tipos de "metodologías" analizadas, puede satisfacer los objetivos presentados en la Figura 5; pero evidentemente las de tipo "distribuido" resultan más explícitas que las de carácter "integrado". Sin embargo, conviene recordar que exigen una elaboración mucho más costosa, lo que no siempre encuentra justificación en el ámbito de la ingeniería.

Para concluir, conscientes que normalmente entendemos por "Naturaleza" aquel espacio físico en el que su esencia se identifica con su evidencia; lo que es causa de nuestra admiración por ella; no podemos, sin

embargo, ignorar que en ocasiones el ingeniero se encuentra ante la oportunidad y el reto de hacerla más hermosa; es el caso de las restauraciones hidrológico-forestales. No se pretende con ello obviar la obligatoriedad en estos proyectos de superar los controles de "impacto ambiental"; sino únicamente tener conciencia que un trabajo que afecta en ocasiones radicalmente a amplias superficies de una cuenca, puede cumplir a la vez con los principios básicos de la ecología y ofrecer la imagen que en su desarrollo ha intervenido un ser inteligente.

ESQUEMA DE UN PROYECTO DE RESTAURACION HIDROLOGICO-FORESTAL

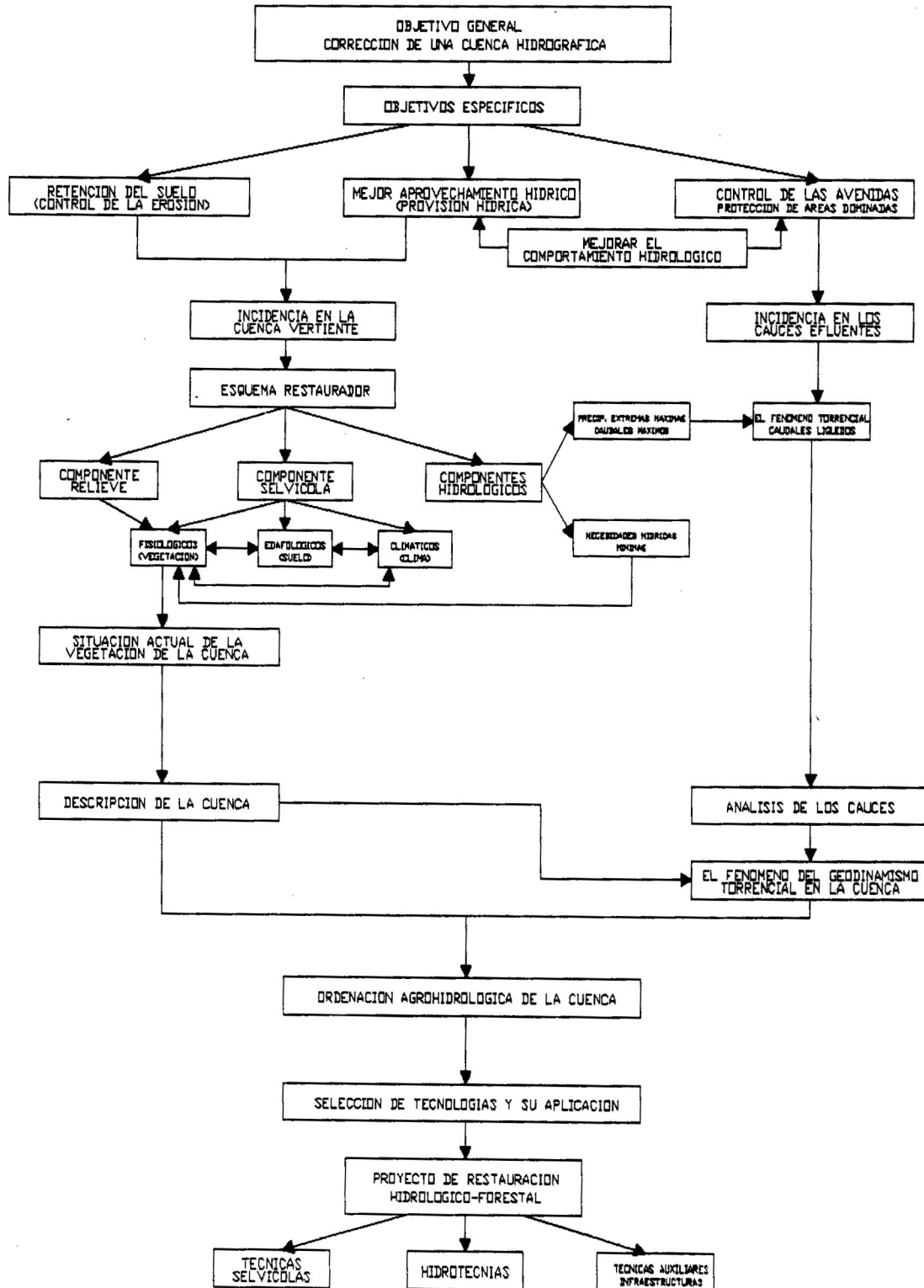


Figura 5.

REFERENCIAS

- Beven K.J. (1985) *"Distributed models"* Hydrological Forecasting, Anderson & Burt editores, Wiley, New York, pp 405-435.
- Clarke R.T. (1973) *"A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use"* Journal of hydrology 19, pp 1-20.
- Crawford N.H. y Linsley R.K. (1966) *"Conceptual model of the hydrological cycle"* Publ. N^o 62 Bulletin IASH 62.
- Dirección General del Medio Ambiente (1985) *"Metodología para la evaluación de la erosión hídrica"*, 150 págs. Serie Documentación del M.O.P.U. Madrid.
- Donigian AS., Imhoff J.C., Bicknell B.R. y Kittle J.L. (1982) *"Guide to the application of the hydrological simulation program-fortran (HSPF)"* 150 págs. Environmental research laboratory, EPA.
- Eichert B.S. (1982), *"HEC-2, Water surface profiles. Users Manual"* Program 723-x6-1202A
- Emmett W.W. (1969) *"The hydraulics of overland flow on hillslopes"* 68 págs. Geological Survey Professional Paper 662-A.
- García Nájera J.M. (1943) (2^a edición, 1962) *"Principios de Hidráulica Torrencial y sus aplicaciones a la corrección de torrentes"*, 297 págs., I.F.I.E. Madrid.
- ICONA-INTECSA (1988), *"Agresividad de la lluvia en España. Valores del factor R de la U.S.L.E."*, 39 págs y mapas, Publicaciones del M.A.P.A.
- ICONA (1987-93) *"Mapas de Estados Erosivos"* (adaptados a las superficies asignadas a cada una de las Confederaciones Hidrográficas de España). Publicaciones del M.A.P.A.
- 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 págs., I.F.I.E. Madrid.
- López Cadenas de Llano F., Mintegui Aguirre J.A. y Pérez-Soba Baro A. (1984) *"Metodología integrada para la determinación de los sedimentos aportados por una cuenca"*, 17 págs, 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 págs. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Forestal. E.T.S.I. Montes. U.P.M. Madrid.
- Mintegui Aguirre J.A. y López Unzu F. (1990) *"La Ordenación agrohidrológica en la planificación"* 306 págs, Servicio de Publicaciones del Gobierno Vasco. Vitoria.
- 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 págs. Fundación Conde del Valle de Salazar. E.T.S.I. Montes. Madrid.
- Mintegui Aguirre J.A., De Simón Navarrete E., García Rodríguez J.L. y Robredo Sánchez J.C. (1993) *"La restauración hidrológico-forestal en las cuencas hidrográficas de la vertiente mediterránea"* 325 págs. Información Técnica N^o 22/93. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía.
- Smart G.M. y Jaeggi M.N.R. (1983) *"Sediment Transport on Steep Slopes"*, 191 págs, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie. Zürich.
- Thiery E. (1891) (2^a edición, 1914) *"Restauration des montagnes, correction des torrents et reboisement"* 480 págs., Librairie Polytechnique Ch. Beranger. Paris et Liège.
- 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. Agricultural Research Service S.9. (1973) *"H.Y.M.O: Problem oriented computer language for hydrologie modeling"*, 76 págs, Texas University.
- Williams J.R. (1975) *"Sediment routing for agricultural watersheds"* Water Ressources Bulletin. American Ressources Association Vol. 11 n^o 5. pp 965-974.
- Wischmeier W.H.(1959) *"A rainfall erosion index for a Universal Soil Loss Equation"* Proceeding Soil Scientific Society of America 23 Madison Wis. pp 246-249.
- Wischmeier W.H. y Smith D.D. (1978) *"Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning"* 58 págs., U.S.D.A., Agriculture Handbook n^o 537. Washington D.C.