

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA FORESTAL

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MONTES

MODELO PARA LA ESTIMACIÓN
DE LAS DISPONIBILIDADES HÍDRICAS
EN LADERA

Doctorando: Andrés Martínez de Azagra Paredes
Ingeniero de Montes

Director de Tesis: José Anastasio Fernández Yuste
Doctor Ingeniero de Montes

Palencia, mayo de 1995

Agradecimientos

A Joaquín Navarro Hevia, compañero de trabajo en las asignaturas de Hidráulica e Hidrología Forestal de la E.T.S. de Ingenierías Agrarias de Palencia, por su apoyo, colaboración y buenos consejos;

a José Anastasio Fernández Yuste, director de esta tesis, por su permanente estímulo, por su comprensión y por su paciencia;

a María Teresa Ramos García por su colaboración matemática en el anexo III;

a Juan Andrés Oria de Rueda Salguero por su contribución botánica (anexo IV);

al Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza y - en especial - a Leopoldo Rojo Serrano por haber confiado en esta línea de investigación incorporándola al proyecto LUCDEME y apoyándola económicamente;

a los hermanos Enrique y Luis Arranz Veganzones por su colaboración indirecta, pero no por ello menos importante, al cultivar la finca de "La Serna" mientras yo me centraba en la elaboración y redacción de esta tesis;

y - por supuesto y ante todo - el agradecimiento a mis padres, Andrés y María del Carmen, a los que debo el haber podido realizar mi vocación felizmente.

¡Gracias!

Palencia, 2 de abril de 1995

INDICE

0 - Resumen	III
I - Introducción	1
II - Fundamentos del modelo	10
1. Introducción	10
2. Funcionamiento de una unidad sistematizada	17
3. Bases e hipótesis del modelo	26
4. Ecuaciones generales	32
5. Etapas de funcionamiento de un microembalse	45
III - Particularización al modelo de infiltración de Horton. Programa informático HYDNUM	50
6. Particularización de las ecuaciones generales al modelo de infiltración de Horton para una intensidad de lluvia constante ..	50
6.1 Introducción	50
6.2 Desarrollo matemático del modelo	51
6.3 Programa HYDNUM. Manual de usuario	74
IV - Particularización de las ecuaciones generales al método del número de curva. Programa informático MODIPE	95
7.1 Introducción	95
7.2 Desarrollo matemático del modelo	97
7.3 Programa MODIPE. Manual de usuario	114
V - Anexos	
Anexo I: Precipitaciones sintéticas	137
Anexo II: Modelo de Horton	142
Anexo III: Obtención de la primitiva de una función auxiliar ..	149
Anexo IV: Método del número de curva	152
Anexo V: Análisis comparado de los números de curva e interpretación de las distintas combinaciones	174
Anexo VI: Estructura de los archivos DCAS del Instituto Nacional de Meteorología	186
Anexo VII: Método de los aguaceros virtuales	190

Anexo VIII: Listado con los principales símbolos utilizados en este trabajo	197
VI - Conclusiones	202
VII - Bibliografía	207
VIII - Programas: HYDNUM.EXE y MODIPE.EXE (en soporte informático)	

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla un modelo matemático que cuantifica el volumen de agua que se infiltra en una ladera, es decir: la disponibilidad hídrica del ecosistema desde el punto de vista de la Hidrología de Superficie. Para tal fin se propone y elabora un nuevo balance hídrico puntual.

Con vistas al diseño de estructuras colectoras de agua que aseguren el éxito de las repoblaciones forestales en zonas áridas (microcuencas, acaballonados, aterrazados, ...) se desarrolla el concepto de sistematización primaria, unidad de terreno que incluye dos zonas bien diferenciadas: una exportadora de escorrentía superficial y la otra recolectora de tales aguas y equipada con un alcorque (o microembalse) del tamaño apropiado para recoger dichos suplementos hídricos.

La aplicación del balance hídrico puntual a la ladera original (degradada) y a la ladera sistematizada - distinguiendo entre áreas productoras y receptoras de escorrentía - constituye el núcleo central de este trabajo. Las ecuaciones que surgen de este análisis permiten simular el comportamiento hidrológico de cualquier terreno en pendiente y cuantificar las disponibilidades hídricas en las distintas situaciones y lugares de un territorio a reforestar, tema de innegable interés para el restablecimiento de nuestros depauperados campos y montes aquejados de graves procesos de desertificación.

Con el fin de facilitar el uso de las mencionadas ecuaciones generales, éstas se particularizan para dos de los modelos más utilizados dentro de la Hidrología: la ecuación de infiltración de Horton y el método del número de curva. El sistema de ecuaciones resultante - en ambos casos harto prolijo - ha aconsejado su informatización, lo que da lugar a dos programas: HYDNUM y MODIPE con sus respectivos manuales de usuario. A través de varios ejemplos prácticos se aclara el funcionamiento y la utilidad de estos programas con lo que se concluye el presente estudio, no sin antes esbozar las líneas de trabajo que han quedado abiertas y que deberán abordarse en un futuro próximo.

SUMMARY

A mathematical model to quantify the infiltration in a slope (i.e. the availability of water in an ecosystem from the standpoint of its surface hydrology) is developed in this study. To that fact a new local water balance is worked out.

For the design of water harvesting structures ensuring a successful afforestation of arid lands (microcatchments, ridging, terracing), the concept of primary systematization is developed. This term refers to a unit area with two markedly different sections: one exporting surface run-off and the other collecting surface run-off by means of an appropriately sized micro-pond receiving the excess water.

At the core of this study lies the application of the local water balance both to the original (degraded) slope and to the systematized slope separating run-off producing from run-off collecting areas. The equations generated through this analysis make possible to simulate the hydrological behaviour of any sloping land and to quantify the available water under different conditions and at specific points of an area intended for afforestation. This, no doubt, should be of help in the rehabilitation of some of our degraded fields and woodlands ravaged by a severe process of desertification.

To assist in the use of these equations, they are spelt out with particular reference to two of the most common models in hydrology: Horton's infiltration equation and the curve number method. The resulting system of equations --- fairly lengthy and elaborate in both cases -- made computerization advisable. Thus, two programmes, HYDNUM and MODIPE, with their accompanying user's manuals have been developed. The final part of the study is taken up by several practical examples which show how to run the programmes as well as their potential usefulness. A final word is given on the avenues opened for further research to be pursued in the near future.

Palabras clave: cosecha de agua, unidad sistematizada, microembalse, microcuenca endorreica, reforestación de zonas áridas, modelo hidrológico, simulación, informatización, ordenadores personales

key words: water harvesting, systematized unit, micropond, endorheic microcatchment, reafforestation of arid zones, hydrologic model, simulation, informatization, micro-computers

I - INTRODUCCION

El presente estudio trata sobre la ordenación y el aprovechamiento de la escorrentía superficial en laderas degradadas. El objetivo último de este trabajo consiste en ofrecer un modelo hidrológico de fácil manejo (es decir: informatizado) que facilite el diseño de trampas de agua para las repoblaciones.

La capacidad del alcorque a excavar junto a cada planta, el tamaño del área de impluvio a asociar a cada microembalse, la altura de los caballones a realizar o la contrapendiente y las represas a perfilar en las terrazas de absorción son magnitudes de vital importancia en cualquier proyecto de repoblación forestal, sobre todo en áreas críticas. El incremento de la dotación de agua en las proximidades de las plantas introducidas, posibilitado con una acertada modificación del microrrelieve en sus alrededores, puede resultar determinante para su arraigo y supervivencia. Al crear un microclima menos árido junto a esas plantas o semillas sus esperanzas de vida aumentarán considerablemente. La reposición de marras será muy escasa o innecesaria con un buen diseño de la forestación.

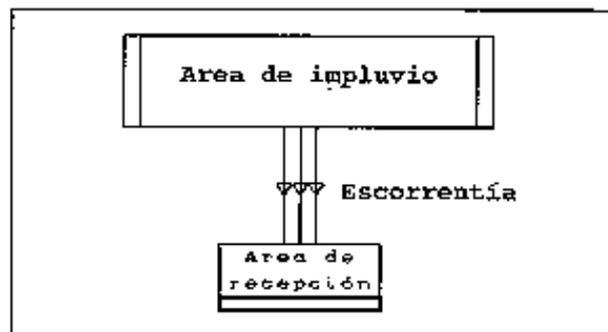
Este trabajo se encuadra dentro del sugestivo tema de la recolección de agua [*water harvesting* en la literatura inglesa]. Sobre este interesante asunto el hombre lleva experimentando desde los tiempos más remotos para lograr almacenar agua potable con la que saciar su sed (aljibes y cisternas) o para la obtención de pastos y cultivos en climas bonancibles pero excesivamente irregulares y áridos, como por ejemplo los climas mediterráneos y los climas subdesérticos cálidos. Vestigios de esta actividad humana están apareciendo por doquier en el mundo, desde España hasta Israel, desde Méjico hasta Australia.

La correcta interpretación de tales hallazgos arqueológicos no siempre es fácil ni está exenta de polémicas y controversias. Un divertido ejemplo al respecto lo encontramos en Tadmor y colaboradores (1957) cuando descubren el verdadero objetivo perseguido por los Nabateos hace 4000 años con la acumulación de las piedras en montones (majanos): buscaron incrementar la

escorrentía en las laderas despedregadas para así regar los campos adyacentes y conseguir buenas cosechas de cereales pese a lo exiguo de las lluvias. No se trataba de monumentos religiosos, como muchos investigadores habían sugerido hasta esa fecha, sino de estrategias hidrológicas para corregir los caprichos del dios de la lluvia que - al parecer - no siempre les era propicio.

La definición más general y breve del concepto de 'recolección de agua' la proponen Critchley y colaboradores (1991): "almacenaje de agua de escorrentía para usos diversos". Una descripción más concreta pero también más restrictiva es la que encontramos en Boers y Ben-Asher (1982): "método para inducir, coleccionar, almacenar y conservar aguas locales de escorrentía superficial para uso agrícola en regiones áridas y semiáridas". Para no ser marginados vamos a ampliar el uso hasta el sector forestal, con lo que nos daremos por satisfechos.

Un sistema de recolección de agua consiste básicamente de dos partes: un área donde se induce y genera la escorrentía superficial (el área de impluvio o productora) y un área en donde se recogen y almacenan dichos aportes hídricos (el área de recepción o colectora). Es en esta área donde se cultiva o se realiza la plantación, que germina, arraiga y crece mejor gracias al microclima favorable inducido.



Principio de la recolección de agua

Existen diferentes técnicas de recolección de agua pero todas ellas tienen los siguientes puntos en común:

a) Se aplican en regiones con lluvias escasas pero intensas.

b) Se aprovechan aguas locales que provienen de superficies pequeñas y cercanas. [El área de impluvio tiene desde unos pocos metros cuadrados hasta unas cuantas hectáreas.]

c) El área colectora almacena el agua recibida para su posterior uso durante los periodos secos. [Las reservas de agua son acumuladas en el mismo suelo del área receptora y/o en depósitos.]

El objetivo de la recolección de agua puede ser diverso: para uso doméstico o ganadero, para uso agrícola (cultivos anuales o perianuales) o para uso forestal (reforestaciones). En este último caso - que es el que vamos a tratar - se trabaja siempre con densidades de plantación elevadas para conseguir espesuras de bosque, lo que exige pequeñas unidades recolectoras que se pueden asimilar a microcuencas.

Pese a ser una técnica aplicada hace ya varios milenios por algunos pueblos agrícolas del Viejo Mundo, resulta curioso comprobar como la Hidrología ha tardado bastantes lustros en empezar a ocuparse de las cosechas de agua.

Es a partir de los años sesenta cuando se inician los primeros estudios científicos al respecto. Consistieron en la exitosa reconstrucción de antiquísimos sistemas de irrigación por aguas de arroyada en el desierto del Neguev. Desde estos primeros estudios, promovidos por Michael Evenari, Leslie Shanan y Naftali Tadmor, se ha progresado mucho por el renovado interés que presentan estas sencillas técnicas de irrigación natural en ciertas zonas áridas. Así, en los últimos años han aparecido varias monografías y manuales sobre las técnicas de recolección de agua, en su mayor parte promovidas y publicadas por organizaciones internacionales y destinadas a programas de desarrollo agrícola en regiones subdesérticas (Finkel et al, 1985; Pacey et al, 1986; Reij et al, 1988; Critchley et al, 1991 y 1992). En ellas se desarrolla un interesante cuerpo de doctrina y se describen los sistemas de recolección de agua empleados en diferentes partes y climas del mundo. También y con un planteamiento eminentemente empírico se

ofrecen orientaciones y criterios para el diseño de tales sistemas. En una buena parte se refieren al cultivo de plantas herbáceas aunque también existen experiencias con cultivos leñosos (pistachos, almendros, olivos, vides, etc.).

España ha seguido la misma tónica general respecto del tema que nos ocupa: un fuerte desinterés hasta tiempos bien recientes pese a la presencia y abundancia de medidas de recolección de escorrentía en muchas de nuestras regiones.

Antes de la completa desaparición de los secarregadíos en la década de los sesenta, ciertos geógrafos describieron el sistema tradicional de riego empleado en numerosos terrenos marginales y abruptos del Sureste Español (Llobet, 1958; Vilá, 1961; Navarro, 1968; Morales, 1969). Sorprende leer en estos artículos como el agricultor salía de casa con el azadón en la mano cuando el cielo amenazaba lluvia para dirigir las aguas de arroyada desde las ramblas y chorreras hasta sus campos a través de boqueras y sangradores. ¡Qué distintas costumbres aquéllas de las actualmente vigentes en el campo! - Por otra parte, el traslado del método al sector forestal parece difícil: pretender que guardas e ingenieros salgan con el azadón cuando truena para derivar el agua de los barrancos hasta las terrazas repletas de brinzales se me antoja un tanto ilusorio.

Desde hace muchos siglos, en almendrales y olivares, en viñedos y algarrobares se ha procurado aprovechar al máximo el agua de lluvia por medio de alcorques y caballones. La infinidad de montañas abancaladas con muretes de piedra en seco o calicantos constituyen soluciones sofisticadas al mismo problema: la lucha contra la indigencia edáfica y pluviométrica.

La transformación del talud natural de la montaña en un graderío de peldaños productivos, la creación de paradas de agua en dichos bancales mediante caballones recrecidos de pedriza (balates), el escalonamiento de las vaguadas y pequeñas ramblas con pequeñas presas o diques de piedra es una constante en muchas de las regiones áridas de España. Son muchos siglos de labor los que se contemplan en tales paisajes, siglos en los que el hombre ha estado practicando eficaces técnicas de recolección de agua,

que en la mayor parte de los casos se han abandonado con la mecanización del campo. Convendría conservar estos paisajes abancalados y aterrizados que costaron tanto esfuerzo a nuestros antepasados, convendría evitar que los muros de piedra revienten y se vacíen de la feraz tierra que contienen. No existe mejor medida contra la erosión que reparar las pequeñas roturas (trenques) que se producen en la mampostería en seco con las lluvias torrenciales antes de que aumenten en las siguientes trombas de agua.

Con la llegada del tractor muchos bancales han sido descuidados al no ser rentables por la pequeña superficie de cultivo que ofrecen. No obstante, la mecanización del campo también ha traído nuevas técnicas de preparación del terreno que persiguen la recolección de agua. Un buen ejemplo de ello lo encontramos en el aserpiado o alumbrado, curiosa labor utilizada en los viñedos de Jerez con la que se crea un relieve alomado que dificulta la escorrentía superficial de forma notoria (Revilla, 1980).

No sólo en la agricultura tradicional sino que en el ámbito forestal el concepto de cosecha de agua y de microcuencas ha estado presente a nivel práctico desde muy antiguo. Las primeras repoblaciones realizadas en las sierras de España y de Ricote a finales del siglo pasado (a partir de 1891) mediante pequeños diques de reconstitución (Montiel Pinilla, 1955), o la reforestación iniciada en la cuenca alta del río Guadalentín en 1907, o la restauración forestal efectuada en las ramblas del río Jiloca (García Cañada, 1924) así lo atestiguan.

En la bibliografía forestal española aparecen numerosos trabajos de interés sobre la repoblación de zonas áridas en donde se refiere la forma de preparar el terreno para retener el agua de escorrentía: diques de reconstitución (Revista de Montes, 1903; p. 596), fajas en contrapendiente (García Cañada, 1924), hoyos con banqueta en contrapendiente (Navarro Garnica, 1950), banquetas o fajas de tracción animal (Soriano Lloret, 1956), acaballados y aterrizados mecanizados (Varios, 1975) y un largo etcétera.

Es a finales de la década de los ochenta, cuando Giráldez y sus colaboradores (1987) introducen el término de recolección de escorrentía en el vocabulario forestal español. La idea es vieja pero arraiga en el sector con fuerza por su certera descripción (de Simón, 1989; Fernández Yuste, 1989). Igualmente, por estas fechas se comienza a hablar de microcuencas. No mucho antes, estos dos vocablos se habían extendido dentro de la literatura forestal en lengua inglesa (Mehdizadeh et al, 1978; Kowsar et al, 1978).

Si el estudio científico de las cosechas de agua se inicia en la década de los sesenta, es a mediados de los años setenta cuando aparece el primer modelo de simulación para una técnica de cultivo que aprovecha la escorrentía superficial (la 'desert strip farming' en el desierto de Arizona; Morin et al, 1975). Desde entonces y hasta la fecha se han propuesto nuevos e interesantes modelos (Boers et al, 1986; Namde, 1987; Villanueva et al (1987); Giráldez et al, 1988; Hari, 1989; Cadot, 1989; Boers, 1994) que ayudan a comprender y a diseñar sistemas de recolección de agua.

Para satisfacer las necesidades hídricas requeridas por las plantas que vegetan en la zona de cultivo, el área de impluvio debe tener el tamaño adecuado. A su vez, el área de recepción ha de poseer una capacidad de almacenamiento de agua acorde con las aportaciones que recibe (tanto a nivel superficial como a nivel edáfico). En consecuencia, y para el diseño de cualquier sistema de recolección de agua, se parte de las necesidades hídricas del cultivo y se define el tamaño del área productora y del área receptora.

Los parámetros fundamentales de partida para el mencionado diseño son: las lluvias del lugar (tanto su cantidad como su distribución) y la escorrentía superficial provocada por tales chubascos en el área de impluvio. Mediante una ecuación de continuidad (en realidad deben ser dos) se simula el funcionamiento del área de recepción. En estos balances hídricos figuran las principales entradas y salidas de agua (tanto las deseadas como las inevitables). Variando la superficie del área de impluvio se puede conseguir que el volumen de escorrentía

aportado complete las necesidades hídricas del cultivo.

En esencia, cualquier modelo de simulación debe incorporar los cálculos que se mencionan en los párrafos anteriores. Sin embargo ninguno hasta la fecha los realiza en su totalidad.

Los dos modelos que merece destacar por su planteamiento, rigor conceptual y grado de elaboración son los de Paule-Darley Cadot (1989) y Theo Boers (1994).

El primero de ellos, desarrollado en la Universidad de Arizona e informatizado por el propio autor, tiene un marcado carácter agrícola. A partir de una serie de datos climáticos sobre precipitaciones, temperaturas y radiación solar diaria el modelo obtiene la evapotranspiración potencial (de acuerdo con Penman) y la escorrentía directa generada en el área de impluvio (por el método del número de curva). Mediante un balance hídrico para la rizosfera del cultivo (planteado igualmente a nivel diario) el modelo determina el déficit hídrico existente (como diferencia entre la ETP y la precipitación diaria caída) y lo trata de aminorar definiendo una relación adecuada entre la superficie productora de escorrentía (S_1) y la superficie cultivada (S_2). Como estimador para hallar dicha relación, el modelo establece que el cociente entre el déficit hídrico y la escorrentía aportada por el área de impluvio debe coincidir con la mencionada relación de superficies (S_1/S_2), imponiendo un límite superior para tal cociente. El programa informático, desarrollado por Cadot en QuickBasic, incorpora una subrutina para generar series temporales sintéticas de datos diarios de precipitación, temperatura y radiación solar. También incluye otra subrutina para simular el crecimiento radicular del cultivo y conocer el espesor de la rizosfera en todo momento.

El modelo propuesto por Theo Boers en 1994 es bastante similar en cuanto a planteamientos, Sin embargo, utiliza sistemas bien distintos para estimar la escorrentía generada en el área de impluvio y para establecer el balance hídrico del suelo en el área de recepción.

Boers indica que la escorrentía superficial aportada se puede

estimar por dos procedimientos: el sistema de regresión lineal o el sistema de la onda cinemática. El primer método propuesto utiliza precipitaciones totales y asume proporcionalidad entre la lluvia caída y la escorrentía generada una vez alcanzado un cierto umbral de escorrentía.

Boers utiliza el modelo de la onda cinemática para describir el flujo del agua de escorrentía a través de un plano infiltrante bajo una intensidad de lluvia constante. De esta manera obtiene el hidrograma de respuesta al aguacero en el área de impluvio con sus correspondientes curvas de concentración y descenso enlazadas por un tramo horizontal de caudal máximo. De acuerdo con el mencionado autor, el impacto de las gotas de lluvia afecta a la lámina de escorrentía de forma tal que la relación entre el caudal y la profundidad del flujo resulta lineal. Dentro del mencionado modelo estudia tres variantes que afectan tanto a la curva de crecida como a la curva de descenso. Cada una de estas variantes tiene sus ventajas e inconvenientes según el autor.

El balance hídrico que se plantea para la rizosfera es bastante complejo (modelo SWATRE de Belmans et al, 1983): La ecuación de Darcy para un flujo insaturado junto con la tasa de transpiración propuesta por Feddes y colaboradores (1978) combinadas a través de la ecuación de conservación de masa conducen a una ecuación diferencial en derivadas parciales que - al parecer - resuelve el problema satisfactoriamente.

Por desgracia y hasta la fecha el modelo desarrollado por Boers no está informatizado, lo que constituye un serio inconveniente a la luz de las complejas ecuaciones que plantea.

El uso de estos modelos para el diseño de repoblaciones forestales en zonas áridas es prácticamente imposible. Sus planteamientos son claramente agrícolas lo que les lleva a establecer balances hídricos del suelo muy precisos, totalmente innecesarios si se trabaja con especies frugales. Con plantear un balance a nivel mensual suele ser suficiente en nuestro caso (Montero de Burgos et al, 1983) dado que no buscamos una elevada cosecha sino que nos basta con que los brinzales arraiguen y prosperen lentamente para que con el paso de los años terminen por

formar un tupido bosque.

Por otro lado y debido al mencionado enfoque agrícola, los modelos existentes se despreocupan por completo del volumen de agua que se infiltra en el área de impluvio. En los sistemas de recolección de agua para la agricultura se crean microclimas artificiales húmedos a modo de oasis. Cuanto más impermeable sea el área productora mayor será su eficiencia de escurrido, lo que se trata de lograr mediante tratamientos físicos, químicos o biológicos (compactación y alisado del terreno, eliminación de piedras, utilización de sales, ceras o riegos asfálticos, supresión de la vegetación, etc.). Nada más lejos que el objetivo perseguido en el sector forestal. El área de impluvio tiene sólo ese carácter de forma coyuntural y transitoria. El volumen de agua que se infiltra en dicho terreno ayuda al restablecimiento de la ladera degradada, razón por la que debe ser cuantificado y hasta incentivado.

Pero con ser importantes estas consideraciones, la razón fundamental por la que los modelos desarrollados hasta la fecha no son aplicables en el sector forestal estriba en que presuponen que todo el agua de escorrentía generada en el área de impluvio se infiltra sin más problemas en el área de recepción. Esta suposición dista mucho de la realidad si no se crean trampas de agua del tamaño adecuado en superficie (microembalses). Ante precipitaciones intensas el agua no tiene tiempo de infiltrarse en el terreno, menos aún si se concentra en zonas de recepción. Tal vez en terrenos agrícolas bien mullidos y profundos pueda admitirse esa simplificación (aunque siempre será arriesgada sin cálculos que la confirmen) pero en modo alguno puede darse por válida tal suposición en los suelos pobres y esqueléticos que suelen ser objeto de repoblación forestal.

Así pues, pasemos a desarrollar un modelo específico y práctico que resuelva las cuestiones planteadas sin más demora: ¡que la ocasión y el tema lo merecen!

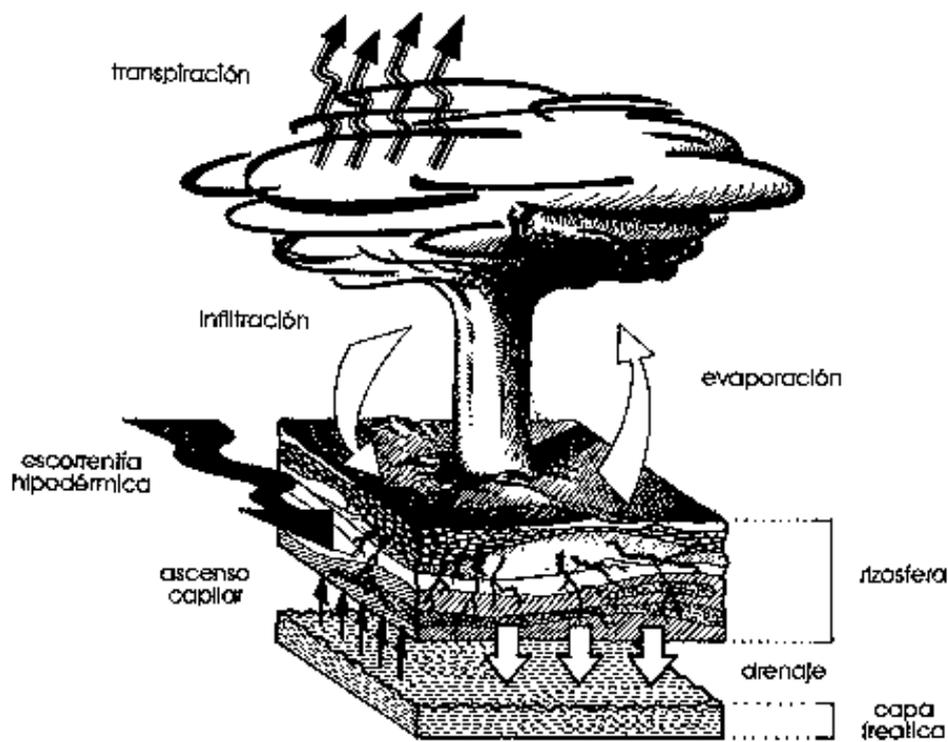
II - FUNDAMENTOS DEL MODELO

1. Introducción

Buena parte de las repoblaciones forestales en laderas degradadas se realizan aplicando medidas de sistematización del terreno que persiguen el control de la escorrentía y de la erosión. Especialmente en las zonas áridas uno de los objetivos prioritarios de estas actuaciones es el de aumentar las disponibilidades hídricas del repoblado, al menos en sus primeras etapas. Surgen así preparaciones del terreno tales como los acaballonados, las terrazas de absorción o las microcuencas con las que el reforestador trata de minimizar las marras por sequía. Al situar a las plantas en los rellanos o pocetas creados artificialmente en el terreno se asegura una mayor dotación de agua para las mismas lo que facilita su arraigo y posterior desarrollo.

Para poder predecir la necesidad o eficacia de tales medidas hay que comparar la situación de partida en la ladera con la preparación proyectada, es decir: hay que estimar la cantidad de agua que poseerá una planta con y sin la sistematización concebida.

La disponibilidad hídrica de una planta en un instante dado coincide con la cantidad de agua asimilable que hay en su rizosfera. Si deseamos conocer la evolución del agua en el perfil edáfico a lo largo del tiempo habrá que establecer un balance basado en la ecuación de continuidad que contemple todas las posibles entradas y salidas de agua (transpiración, evaporación física y drenaje como salidas; infiltración, ascenso capilar y escorrentía hipodérmica como entradas). La tarea no es en modo alguno fácil, si se desea superar el mero planteamiento y desarrollar unos modelos precisos a la vez que aplicables en la práctica. De ahí que se suela recurrir a ciertas simplificaciones. Los diagramas bioclimáticos de Montero de Burgos o la ficha hídrica de Thornthwaite, por citar dos modelos muy arraigados en nuestro ámbito forestal, son buenos ejemplos de ello.



Salidas y entradas de agua en la rizosfera

Si nos fijamos en las entradas de agua, la infiltración constituye la principal y - muchas veces - única fuente de humedad para un suelo: el ascenso capilar exige la presencia de una capa freática somera; los aportes laterales debidos a la escorrentía hipodérmica suelen producirse en perfiles saturados previamente de agua de manera que no suponen más que agua de tránsito que continúa su migración oblicua o que percola.

En este trabajo vamos a tratar de cuantificar la infiltración que se produce en un suelo como punto de partida para poder determinar la cantidad de agua disponible en un lugar concreto. El volumen de agua infiltrado tiene su origen en la precipitación caída así como en la escorrentía superficial generada por la precipitación. Sólo en terrenos llanos que no estén dominados se puede admitir que la precipitación incidente se infiltra en donde cae (si no se evapora antes). En cambio, en una ladera el dato de partida fundamental para poder determinar la cantidad de agua infiltrada no es la precipitación sino la precipitación modificada

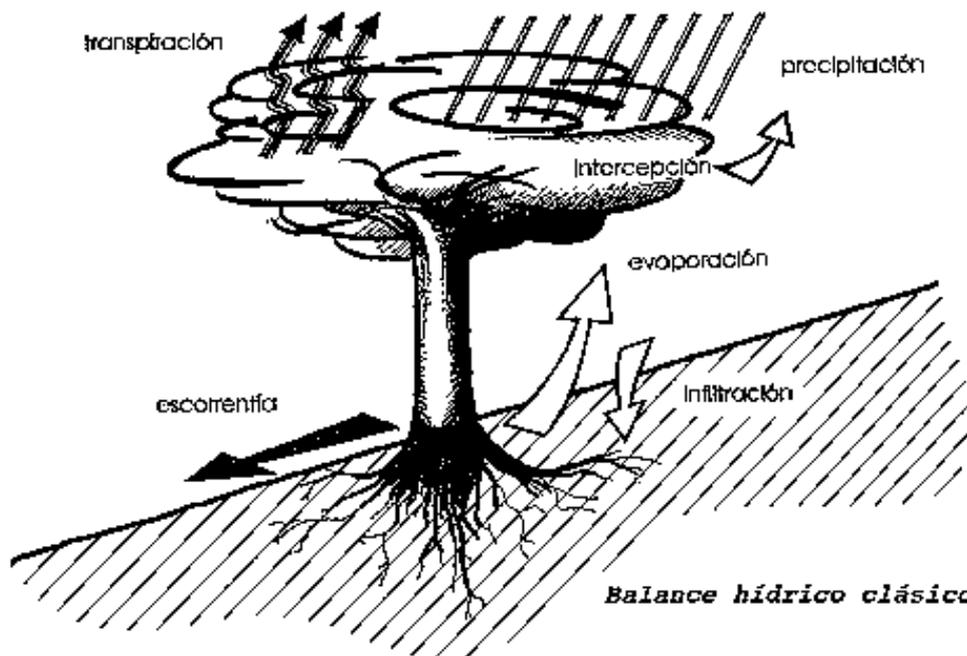
por la escorrentía superficial.

Surge así la idea fundamental de este trabajo, tan sencilla como incuestionable pero que hasta la fecha no parece haber sido convenientemente desarrollada pese a su innegable interés dentro de la Hidrología Forestal de Superficie.

El ciclo hidrológico local que aparece en todo tratado de Hidrología establece que la precipitación puede seguir diferentes caminos: puede ser interceptada por la vegetación, puede escurrir superficialmente, puede infiltrarse en el terreno o puede ser evapotranspirada. Así, podemos escribir:

$$P = I_t + I + E_s + E_v$$

siendo: P = precipitación; I_t = intercepción; E_s = escorrentía superficial; E_v = evapotranspiración



Se trata de una descripción que se fija en el recorrido que siguen las gotas que han caído en un punto. Plantea hacia dónde van esas gotas: si retornan a la atmósfera por intercepción, o por evaporación, o por transpiración, o si se infiltran o si - por el contrario - escurren por la superficie del terreno. Esta visión es

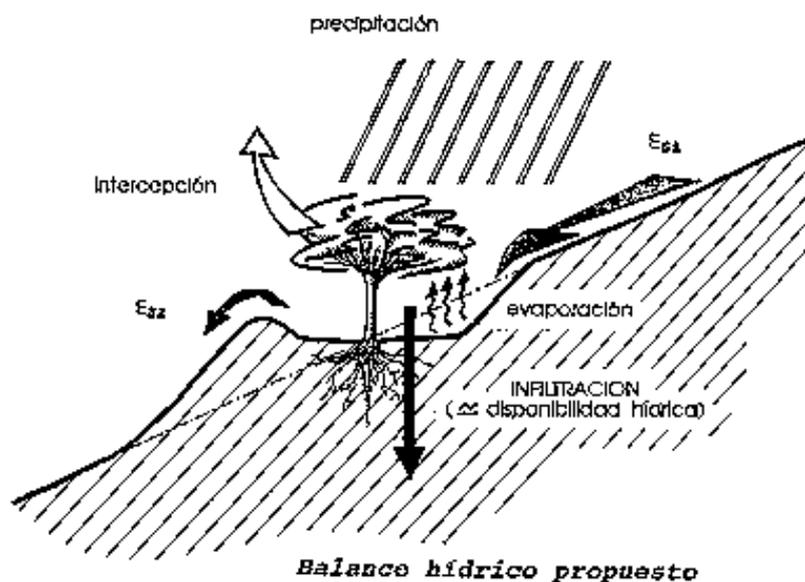
muy intuitiva y sirve como introducción a los componentes del ciclo hidrológico. También permite desarrollar balances hidrológicos globales para una cuenca o cuantificar el valor ponderado que toma alguno de sus componentes, por ejemplo la escorrentía.

Desde el punto de vista de la economía del agua, el balance planteado tiene muy poca utilidad. Los caminos que sigue el agua para marcharse del lugar donde precipitó carecen por completo de interés en este caso. El enfoque debe ser diametralmente opuesto: no interesa el agua que se va sino el agua que se queda, el agua que se infiltra en el terreno con la posibilidad de ser retenida en la rizosfera.

El balance hídrico que proponemos en este trabajo para poder cuantificar las disponibilidades hídricas en un punto es el siguiente:

$$H = I = P - I_t - E + E_{s1} - E_{s2} \quad [1]$$

siendo H = disponibilidad hídrica del lugar; I = volumen de agua infiltrado; P = precipitación; I_t = interceptación; E = evaporación física desde la superficie del suelo; E_{s1} = agua que llega al lugar por escorrentía superficial y E_{s2} = agua que escapa del lugar por escorrentía superficial.



La cantidad de agua que se infiltra en un lugar (I) como consecuencia de un aguacero (P) se puede calcular a partir de la precipitación que llega al suelo (P - I_t), de la evaporación directa que se produce desde los charcos formados (E), y de la diferencia entre la escorrentía superficial que llega y la escorrentía que escapa del punto considerado (E_{s1} - E_{s2}).

El balance hídrico anterior constituye el pilar fundamental del modelo que sobre disponibilidades hídricas en ladara desarrollaremos en los próximos capítulos. Se trata de una ecuación sencilla; similar pero a la vez muy diferente en cuanto a planteamiento y aplicaciones del balance hidrológico local clásico antes enunciado.

El dato de partida para poder determinar la cantidad de agua disponible en un punto no es la precipitación sino la infiltración que se produce en dicho punto. Sin adentrarnos en el suelo, es decir a nivel de Hidrología de Superficie, cabe interpretar a la infiltración como disponibilidad hídrica a falta de un balance (tipo ficha hídrica) que cuantifique el contenido de agua en la rizosfera. Por eso en la ecuación establecida hacemos coincidir infiltración con disponibilidad hídrica.

El balance enunciado puede particularizarse para distintas situaciones. Una simplificación suficientemente aproximada para los objetivos que se persiguen en este trabajo, consiste en prescindir de la interceptación y de la evaporación directa. Son dos componentes de muy escasa relevancia en la mayor parte de las situaciones posibles. Tan sólo si el período de encharcamiento tras el aguacero fuese bastante prolongado por encontrarnos en una hondonada y con un suelo impermeable (E ≈ 0 mm), o si la vegetación es muy tupida y consideramos un aguacero de baja cuantía (I_t ≈ 0 mm) no podremos hacer tal simplificación.

$$DH = I = P + E_{s1} - E_{s2} \quad [2]$$

El presente trabajo de investigación va a centrar buena parte de sus esfuerzos en cuantificar los dos términos de escorrentía superficial: E_{s1} y E_{s2}.

En un terreno llano las dos componentes anteriores son nulas (E_{s1} = 0 mm y E_{s2} = 0 mm). La disponibilidad hídrica coincide con

la precipitación infiltrada. Por contra, en ladera el dato de partida para poder determinar la cantidad de agua disponible en un punto, no es la precipitación sino la precipitación modificada por la escorrentía. De ahí el nombre de uno de los programas informáticos que se desarrollan en este trabajo: MODIPE, MODificación de Precipitaciones.

Muchos recordarán que en Hidráulica la cinemática de un líquido puede resolverse según dos perspectivas bien diferentes: una, siguiendo a las partículas en su movimiento para conocer su trayectoria y la segunda, fijando un punto y describiendo el movimiento de las porciones fluidas que pasan por ese lugar. Ambas concepciones resuelven el problema planteado: en el primer caso se trata de la descripción de Lagrange, la segunda solución se debe a Leonard Euler. Las ecuaciones de Lagrange resultan idóneas para ciertas situaciones mientras que para otros desarrollos de la Hidráulica los planteamientos de Euler compiten en clara ventaja. Eso explica que ambas teorías coexistan.

Salvando las distancias, el balance hídrico que proponemos sigue la línea argumental de Euler mientras que la ecuación clásica tiene un planteamiento similar al de Lagrange. En el primer caso nos fijamos en lo que queda en un lugar, la segunda ecuación sigue el camino de las gotas que cayeron en ese lugar. Cada uno de los dos balances tiene sus aplicaciones: el balance hídrico clásico permite el estudio de crecidas o de los recursos hidráulicos de una cuenca mientras que la ecuación que pretendemos desarrollar en este trabajo puede llegar a ser útil a edafólogos, ecólogos y reforestadores.

Al consultar la bibliografía, hemos observado con sorpresa que hasta en las monografías sobre Hidrología Forestal se precinde del balance hídrico localista. Desde luego que no nos hemos de quejar por ello, puesto que si no carecería de interés este trabajo, pero pensamos que conviene analizar este hecho: ¿Por qué no se ha desarrollado la descripción hidrológica de Euler y sí en cambio la de Lagrange?

A nuestro juicio se debe en gran medida a que de forma tradicional la Hidrología ha estado vinculada a la Hidráulica. El

hidrólogo era antes que nada un buen hidráulico y - ¡claro está! - el agua en movimiento, los hidrogramas, las crecidas... constituían el núcleo central de dicha ciencia. Nada mejor que el balance hídrico de Lagrange para abordar todas estas cuestiones. Por otro lado, la Hidrología Forestal surge desde la Hidrología de los cauces, surge desde una perspectiva eminentemente torrencial. Un término revelador al respecto es el de *precipitación efectiva*, término que se aplica a la porción de lluvia que escurre superficialmente hasta los cauces. ¡Efectiva para quién?! No será desde luego para las plantas de la ladera que se quedan sin tan preciado recurso sino para los que desean demostrar sus conocimientos sobre las ecuaciones de Saint Venant y sus numerosas particularizaciones.

La Hidrología Forestal se encuentra todavía muy influenciada por la Hidrología Civil de los Ingenieros de Caminos, lo que - sin duda - la enriquece. No vamos aquí a entrar en las trasnochadas controversias gremiales de primeros de siglo, pero lo cierto es que para nosotros, los Ingenieros de Montes, la aportación específica de un río debe pasar a un segundo plano. En los degradados montes y eriales de nuestra seca España debemos retener las exiguas precipitaciones que caigan, debemos enriquecer a nuestros repoblados con ese bien escaso y preciado que es el agua, para que arraiguen y se desarrollen. Sólo así invertiremos el tan temido proceso de desertificación. Nuestro cometido consiste en alimentar a las plantas con agua en vez de a los pantanos. El balance hídrico que nos interesa no es el clásico sino el localista planteado a escala de microcuencas. Esta herramienta de trabajo es la que queremos desarrollar para el mejor diseño y buen éxito de las repoblaciones en España.

A primera vista, la postura parece contraria a los intereses inmediatos del hombre pero en modo alguno es así. No conviene olvidar que somos seres heterótrofos. Para nosotros cualquier organismo fotosintético es riqueza, cualquier bosque una inagotable despensa llena de alimentos... ¡Cuánto más ricos seremos si sustituimos las interminables laderas agostadas y desnudas de la España árida por bosques y matorrales siempre verdes, dispuestos a transformar la luz en alimento hasta en los días más sofocantes del verano!

2. Funcionamiento de una unidad sistematizada

Con la sistematización primaria de una ladera lo que se hace es dividir la misma en una serie de unidades menores. Para ello se altera el microrrelieve del terreno por medio de muretes, caballones, surcos, regueros, plataformas a nivel o en contrapendiente, hoyas, pocetas, alcorques u hondonadas artificiales. Se consigue así una parcelación de la ladera. Cada compartimento constituye una unidad sistematizada en la que, a ser posible, todo el agua de escorrentía debe quedar retenida en la parte inferior de la unidad. A dicha zona favorecida por la escorrentía superficial la denominamos área de recepción (o área colectora). A la superficie que aporta dicho agua de escorrentía se le llama área de impluvio (o área productora). Ambas constituyen la unidad sistematizada.

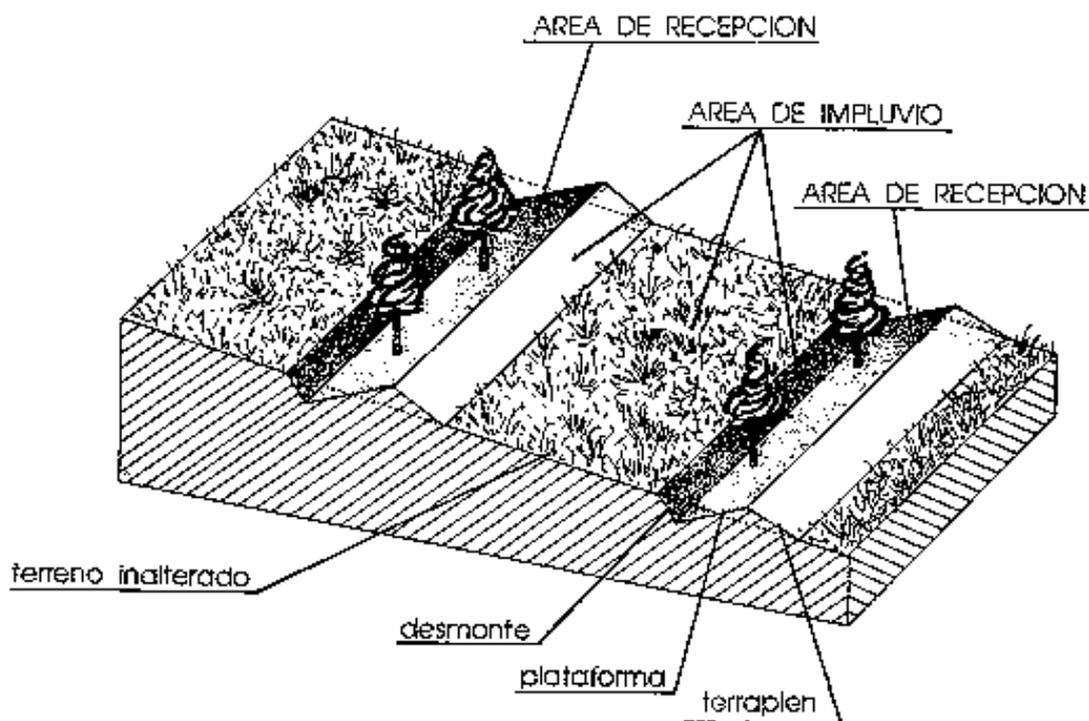
Muchos de los métodos de preparación del suelo para repoblación originan una sistematización primaria. El primer paso para poder analizar su efecto hidrológico consiste en identificar la unidad sistematizada. En el caso de las banquetas con microcuenca la identificación es inmediata: la banqueta se corresponde con el área de recepción y el resto de la microcuenca coincide con el área de impluvio.

Con el acaballonado o con el aterrazado se origina una cuenca de contorno. El caballón y sus aledaños o la plataforma de la terraza se corresponden con el área de recepción. La superficie restante hasta el caballón o terraza superior constituye el área de impluvio. Para individualizar cada unidad se debe trabajar con la superficie (o longitud de labor) que corresponde a cada planta o semilla y que depende, claro está, de la densidad de plantación o siembra.

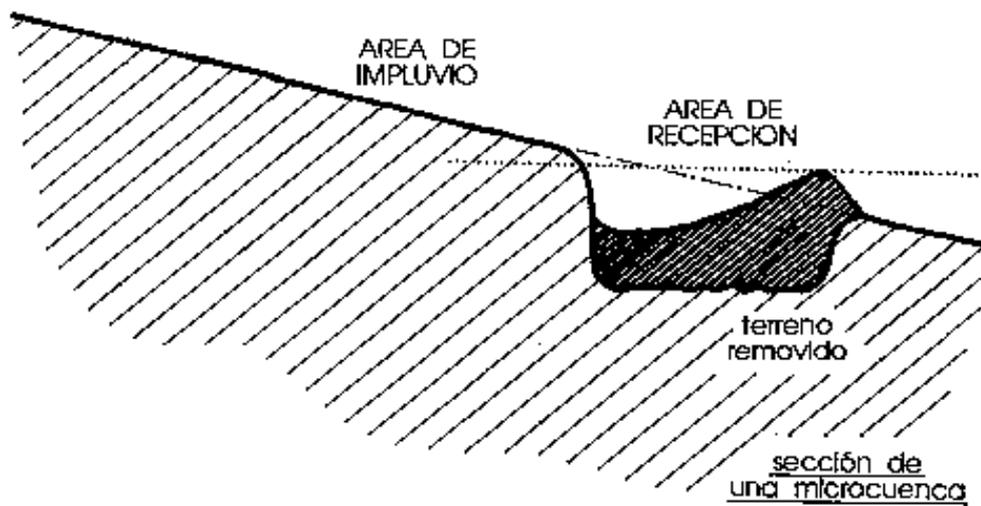
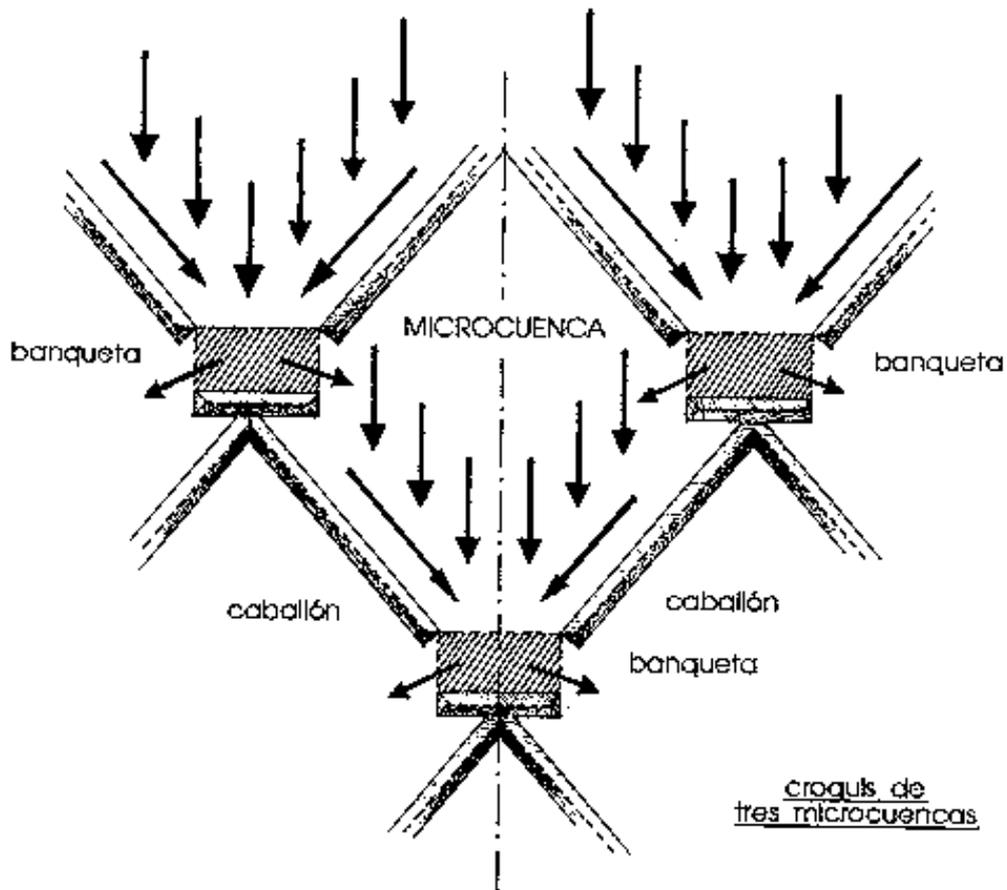
Para otros procedimientos de preparación del suelo la identificación de la unidad sistematizada no resulta tan inmediata. Para el subsolado lineal en curvas de nivel se puede utilizar el mismo criterio que con el acaballonado: la separación entre surcos consecutivos plantados delimita la unidad sistematizada; el área de recepción se corresponde con la superficie removida por el subsolador para una planta, el área

restante es el área de impluvio. El subsolado cruzado en terrenos inclinados define una retícula de forma romboidal. Cada rombo puede ser interpretado como unidad sistematizada en la que el área de recepción se identifica con el vértice generado por las dos pasadas oblicuas del tractor.

Según la economía del agua va teniendo menos importancia en la preparación del terreno, la unidad sistematizada va quedando más y más desdibujada hasta que termina por desaparecer: En el ahoyado simple (sin alteración del microrrelieve) y en las casillas tal identificación es ya bastante forzada; en el laboreo pleno carece por completo de sentido. Se llega al extremo opuesto en que la preparación del suelo persigue su drenaje. Tal es el caso del acaballonado en el páramo ácido palentino.

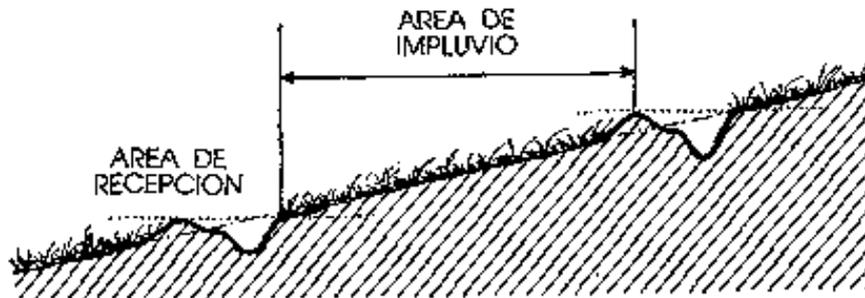


*Terrazas de absorción
(en contrapendiente)*

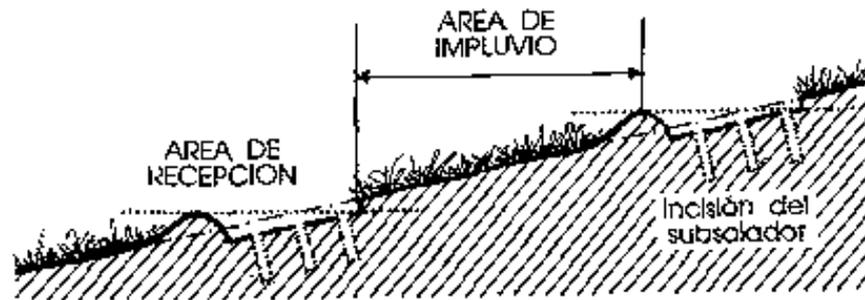




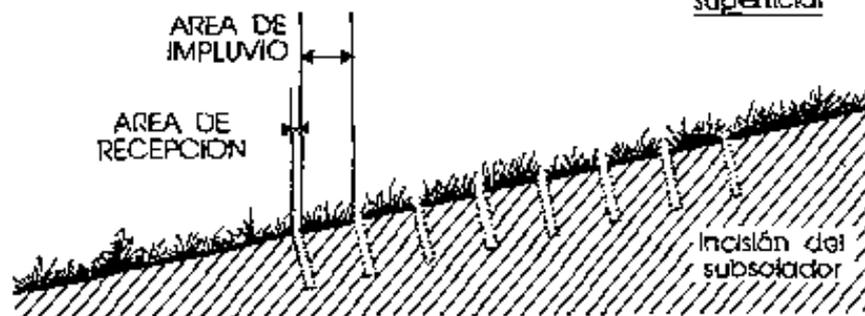
a) Terreno Inalterado



b) acaballonado con distorde

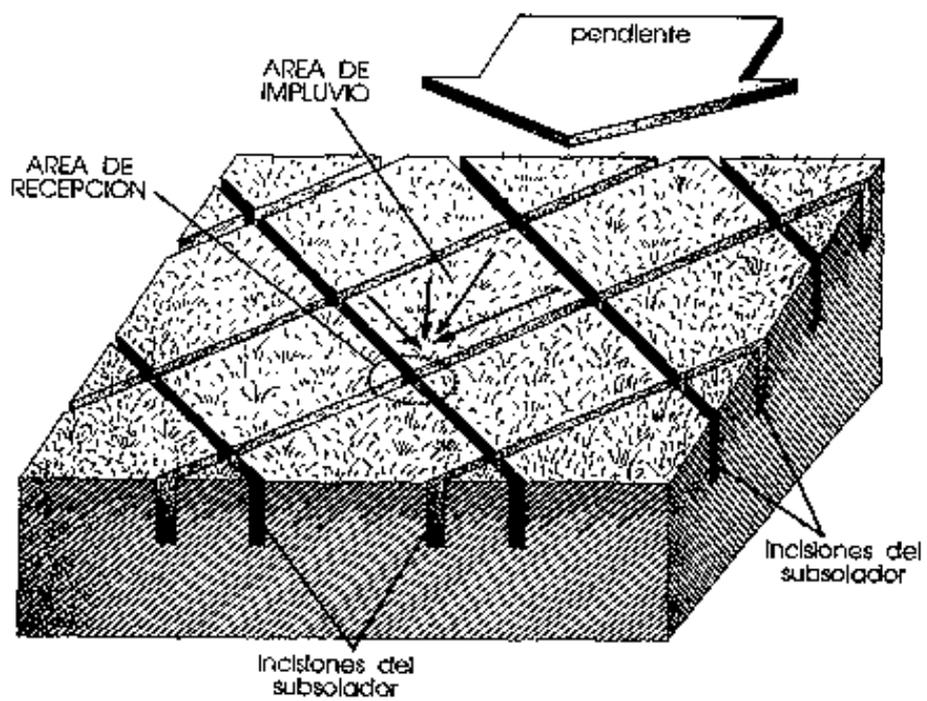


c) Acaballonado superficial



d) Subsolada lineal

diferentes preparaciones del suelo



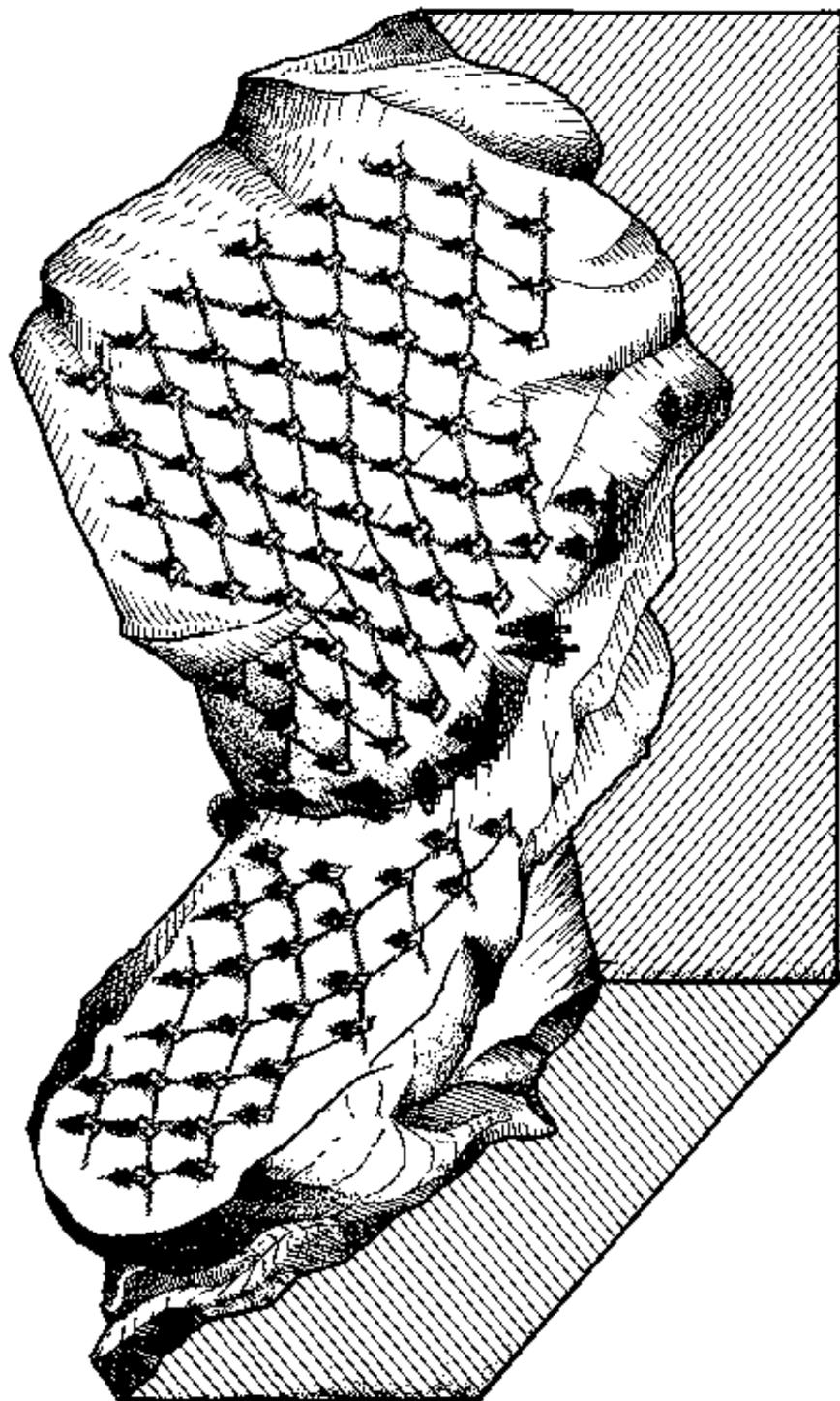
Subsolado plano (completo)

Aunque en un principio y con la sistematización primaria lo que se desea es formar compartimentos estancos, endorreicos, que retengan cualquier precipitación caída, ante ciertos episodios de lluvia excepcionales hay que prever la evacuación ordenada de los excedentes sin que se destruya la parcelación establecida ni se produzcan procesos erosivos graves. Tal necesidad será tanto mayor cuanto más patente sea la compartimentación efectuada y cuanto mayores sean área de impluvio y microrrelieve proyectados. A la red de drenaje artificial dentro de la ladera para desaguar estas demasías se la denomina sistematización secundaria. Los rebosaderos, canales, zanjas y vertederos que conforman la sistematización secundaria se apoyan en la red natural de drenaje, quien concluye dicha evacuación. La formación eminentemente hidráulica de los hidrólogos forestales se revela aquí con toda nitidez por el hecho de que es esta sistematización secundaria la que con más detalle suele ser estudiada.

El comportamiento hidrológico de cualquier sistematización queda definido mediante tres precipitaciones características que vamos a denominar precipitación mínima, precipitación límite y precipitación máxima. La primera se corresponde con el aguacero de menor cuantía e intensidad que genera escurrentía en el área de impluvio. Con precipitaciones menores el área de recepción no se verá enriquecida por aguas alóctonas de escurrido.

La precipitación límite es aquella que genera un volumen de escurrentía máximo capaz de ser retenido en su totalidad por el área colectora. En buena lógica para que la sistematización primaria resulte eficaz, la probabilidad de que se produzcan aguaceros más copiosos deberá ser tanto más baja cuanto más árido sea el lugar.

La precipitación máxima se refiere a la sistematización secundaria y es aquella que aún puede ser evacuada con orden a través del sistema de canales, zanjas y (o) vertederos previsto. Precipitaciones mayores desbordan la capacidad de desagüe del sistema y suponen un grave riesgo para la estabilidad del diseño hidrológico planteado en la ladera. La probabilidad de que sucedan tales episodios de lluvia debe ser baja para que las garantías de éxito de la sistematización sean elevadas.



Isdera sistematizada con microcuenca y red secundaria de drenaje

Ante un aguacero inferior a la precipitación mínima, la disponibilidad hídrica en cualquier punto de la ladera será la misma e igual que la precipitación registrada, ya que no se produce escorrentía superficial. [Ello si se prescinde de la intercepción, como va a ser habitual a lo largo de esta exposición; no en vano se plantea el estudio para laderas degradadas sin apenas vegetación que las proteja.]

Si llueve una cantidad superior a la precipitación mínima pero inferior a la precipitación límite, la disponibilidad hídrica promedio en la ladera seguirá coincidiendo con la precipitación registrada puesto que cada unidad sistematizada funciona como una cuenca independiente y estanca. Sin embargo se produce una distribución del agua caída que favorece al área colectora. La disponibilidad hídrica en el área de recepción es mayor que la precipitación registrada, al estar compuesta por la precipitación incidente y la escorrentía generada por el aguacero en el área productora. Ello va en detrimento de los recursos hídricos de esta última zona.

Si cae un chubasco de mayor cuantía que la precipitación límite se desbordará la sistematización primaria. Parte del agua caída escapará de la ladera por los canales y zanjas previstos hasta la red de drenaje natural. La consecuencia inmediata de este hecho es que las disponibilidades hídricas medias de la ladera serán inferiores a la precipitación registrada. No obstante, el área de recepción dispondrá de más agua que el área de impluvio e incluso podrá ocurrir que acumule más cantidad que la lámina de lluvia equivalente registrada en un pluviómetro.

Una precipitación mayor que la máxima que admite la sistematización secundaria tiene las mismas consecuencias para la disponibilidad hídrica de la ladera que el chubasco analizado con anterioridad. Tan sólo que en este caso el colapso del sistema de evacuación de los excedentes hídricos puede provocar la destrucción por desbordamiento incontrolado y erosión de la parcelación primaria planteada.

El análisis anterior se complica si hacemos intervenir a la intensidad de lluvia: No sólo la cantidad sino también la distribución de la lluvia en el tiempo influyen en el proceso de infiltración y escorrentía. Un estudio preciso y riguroso del comportamiento de una unidad sistematizada exige comparar intensidades de lluvia con velocidades de infiltración tanto en el área de impluvio como en el área de recepción. Más adelante abordaremos esta cuestión.

3. Bases e hipótesis del modelo

Para conocer la disponibilidad hídrica en un punto como consecuencia de un aguacero hay que desarrollar la ecuación fundamental:

$$M = I = P + E_{s1} - E_{s2} \quad [2]$$

Esta ecuación, ya enunciada anteriormente, establece que para obtener el volumen de agua infiltrado (o lo que es lo mismo: la disponibilidad hídrica de un punto, M) hay que añadir a lo que llueve en el lugar (P) el volumen de escorrentía superficial que llega al punto en estudio (E_{s1}) y restar la escorrentía que escapa del sitio analizado (E_{s2}).

Los datos pluviométricos o pluviográficos permiten conocer el primer sumando de la ecuación. Para cuantificar E_{s1} y E_{s2} hay que caracterizar el punto y sus alrededores tanto a nivel topográfico (relieve) como hidrológico (capacidad de infiltración).

Si nos fijamos en una ladera preparada para entorpecer a la escorrentía superficial, apreciaremos las distintas unidades o parcelas de sistematización proyectadas. En cada unidad distinguiremos dos zonas bien diferentes en cuanto a su función hidrológica: un área productora y otro área receptora de escorrentía.

En el área de recepción el balance hídrico se escribe así:

$$H = \text{DESP} = P + E_{s1} - E_{s2} \quad [3]$$

en donde DESP es la disponibilidad hídrica en el área de recepción, E_{s1} es la escorrentía generada en el área de impluvio y E_{s2} es la escorrentía que se va del área de recepción y - en consecuencia - de la unidad sistematizada a raíz de la precipitación caída P .

En el área de impluvio la ecuación a considerar es más sencilla y adopta la siguiente expresión:

$$H = PIMP = P - E_{s1} \quad [4]$$

siendo PIMP la disponibilidad hídrica (o infiltración) en el área de impluvio y E_{s1} el agua que escurre de esta superficie y que alimenta al área de recepción.

Las dos ecuaciones anteriores constituyen la base de los dos modelos (HYDNUM y MODIPE) que se desarrollan en este trabajo.

Ambas ecuaciones se satisfacen con todo rigor siempre que el aguacero analizado sea inferior a la precipitación límite. Para precipitaciones mayores también se cumplen si la escorrentía que escapa de cada unidad no queda retenida en las subyacentes, es decir: si se concibe cada unidad sistematizada independiente de las demás. Tal abstracción se ajusta mucho a la realidad siempre que las unidades sistematizadas de la ladera sean iguales.

En efecto: si suponemos que la ladera está constituida por unidades sistematizadas idénticas, la posibilidad de que el agua que escapa de una de estas unidades pueda quedar retenida en otra que se encuentre más abajo debe descartarse porque la unidad inferior se encontrará colmada y estará emitiendo sus propios excedentes de agua cuando comience a recibir la mencionada escorrentía de las unidades superiores. En tal situación, esta escorrentía difícilmente puede quedar retenida en los pisos inferiores. Constituye un agua de tránsito que tiene que ser evacuada a través de la sistematización secundaria.

La disponibilidad hídrica promedio de la ladera se obtiene como media - pero ponderando según superficies - de la infiltración ocurrida en el área de impluvio y en el área de recepción:

$$PROM = \frac{S_1 \cdot PIMP + S_2 \cdot DESP}{S_1 + S_2} \quad [5]$$

en donde S_1 es el área de impluvio y S_2 el área de recepción.

En buena lógica esta última variable habrá de ser menor o igual que la precipitación registrada ($PROM \leq P$) y será tanto menor con relación a P cuanto mayor sea la escorrentía que escapa de cada unidad (E_{s2}).

Otra inecuación de interés que también conviene concretar, pues ayuda a comprender el funcionamiento de una ladera sistematizada, establece que la disponibilidad hídrica del área de impluvio es siempre menor o igual que la precipitación caída ($PIMP \leq P$). Sólo para precipitaciones inferiores a la mínima se satisface la igualdad.

En cambio, las disponibilidades hídricas en el área de recepción pueden llegar a ser superiores a las que proporciona el aguacero a un terreno llano ($DES \geq P$), gracias a los aportes suplementarios de agua que recibe del área de impluvio. La trascendencia de este hecho para el éxito de las reforestaciones en las depauperadas laderas de nuestra España seca, inmersas en peligrosos procesos de desertificación por la indigencia hídrica que padecen, no precisa de comentarios.

La sistematización de una ladera sedienta habrá sido tanto más útil y favorable al repoblado cuanto mayor número de aguaceros idóneos (es decir: comprendidos entre la precipitación mínima y la precipitación límite) se hayan producido desde la plantación.

En terrenos degradados que presentan una baja tasa de infiltración, la precipitación mínima se rebasa en la mayor parte de los episodios de lluvia. - ¿Pero cuántas laderas padecen sequía edáfica por ser incapaces de retener el poco agua que reciben del cielo? - ¿Alguien ha sido capaz de contabilizarlas en España?

Sea por la textura y estructura de sus suelos, o por la falta de materia orgánica en sus horizontes superiores, o por estar apelmazados debido a una carga ganadera excesiva, o por tener una marcada tendencia a formar costras superficiales impermeables o por haber desarrollado una capa hidrófoba tras un incendio, o por quién sabe qué otras desgraciadas características o calamidades propiciadas por el hombre, pero lo cierto es que se cuentan por millares.

En tales situaciones, harto frecuentes en nuestra castigada geografía para regocijo de la aridez, sólo una preparación del suelo que sistematice la ladera podrá poner freno al proceso desertificador descrito y logrará una elevada supervivencia de las plantas que instalemos en las áreas favorecidas. Máxime si consideramos el hecho de que tenemos un clima marcadamente

torrencial, con unas precipitaciones esporádicas y muy intensas que tienden a generar aguas de arroyada inútiles para aplacar la sed de la ladera y que tan sólo contribuyen a su empobrecimiento por erosión hídrica.

Para poder evaluar la eficacia de la preparación del suelo que deseamos realizar debemos conocer la situación original de partida. La disponibilidad hídrica en un lugar que no sea receptor natural de escorrentía (como rellanos, cubetas o aledaños de la red de drenaje) puede calcularse mediante la ecuación:

$$DH = \text{ANTES} = P - \Delta E_s \quad [6]$$

siendo ΔE_s la lluvia neta (o escorrentía superficial) que produce el aguacero en la ladera sin intervención.

Sólo bajo climas áridos y si son numerosos los episodios de lluvia que generan escorrentía superficial en la ladera, interesará crear estructuras recolectoras de agua (terrazas o fajas de absorción, microcuencas, etc.). La eficiencia de estas medidas se aprecia al comparar la situación actual con la proyectada. Si el valor de ANTES resulta inferior a DESP y a PROM para muchos de los aguaceros que caen en la zona, la sistematización resultará propicia para la economía del agua.

La importancia de este tema nos anima a recapitular. Volvamos a concretar las bases e hipótesis del modelo de una forma clara y concisa:

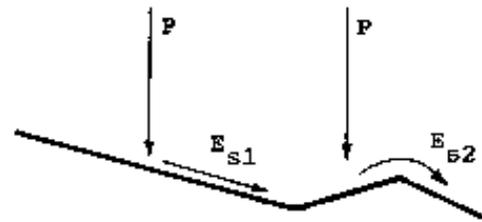
1) Una ladera sistematizada con el fin de incrementar sus disponibilidades hídricas se compone de un conjunto de unidades o estructuras proyectadas para funcionar como pequeñas cuencas endorreicas en la mayor parte de los episodios de lluvia del lugar.

2) Dentro de cada unidad sistematizada cabe distinguir entre el área exportadora y el área receptora de la escorrentía superficial; a la primera zona la denominamos área de impluvio y a la segunda zona área de recepción. Esta última zona debe poseer un rebosadero o emisario en previsión de fuertes aguaceros.

3) Las unidades sistematizadas se suponen independientes entre sí, de manera que el agua que escapa de una de ellas no puede quedar retenida en una unidad inferior.

4) Las tres ecuaciones que estiman las disponibilidades hídricas en la ladera sistematizada son:

$DESP = P + E_{s1} - E_{s2}$	[3]
$PIMP = P - E_{s1}$	[4]
$PROM = \frac{S_1 \cdot PIMP + S_2 \cdot DESP}{S_1 + S_2}$	[5]



siendo: P, la precipitación del aguacero analizado

DESP, la disponibilidad hídrica del área de recepción

PIMP, la disponibilidad hídrica del área de impluvio

PROM, la disponibilidad hídrica media de la ladera

E_{s1}, la lluvia neta o escurrimiento superficial que se produce en el área de impluvio

E_{s2}, la escurrimiento superficial que escapa de la unidad sistematizada

S₁, superficie correspondiente al área de impluvio

S₂, superficie del área de recepción

5) Los aguaceros pueden ser clasificados en cuatro bloques de acuerdo con el comportamiento hidrológico de la sistematización de la ladera: precipitaciones débiles, idóneas, excesivas y dañosas.

a) Precipitación débil, menor que la precipitación mínima (P₁) que provoca escurrimiento en el área de impluvio

$$\text{Si } P < P_1 \longrightarrow E_{s1} = E_{s2} = 0$$

$$PROM = DESP = PIMP = P$$

b) Precipitación idónea, si está comprendida entre la precipitación mínima y la precipitación límite (P₂) que aún no provoca escurrimiento fuera de la unidad

$$\text{Si } P_1 < P \leq P_2 \longrightarrow E_{s1} > 0 \quad \cap \quad E_{s2} = 0$$

$$PIMP < P \quad \cap \quad DESP > P \quad \cap \quad PROM = P$$

c) Precipitación excesiva, si está comprendida entre la precipitación límite (P2) y la precipitación máxima (P3) que aún puede ser evacuada de forma ordenada a través de la sistematización secundaria

$$\text{Si } P2 < P \leq P3 \implies E_{s1} > 0 \quad \cap \quad E_{s2} > 0$$

$$PIMP < P \quad \cap \quad DESP \overset{?}{\leftarrow} P \quad \cap \quad PROM < P$$

d) Precipitación dañosa, si es superior a la que admite la sistematización secundaria (P3); existe peligro de ruina de la parcelación por flujos incontrolados, erosivos.

$$\text{Si } P > P3 \implies E_{s1} > 0 \quad \cap \quad E_{s2} > 0$$

$$PIMP < P \quad \cap \quad DESP \overset{?}{\leftarrow} P \quad \cap \quad PROM < P$$

6) Para evaluar las disponibilidades hídricas de la ladera antes de la sistematización se utiliza la siguiente ecuación:

$ANTES = P - \Delta E_s$	[6]
--------------------------	-----

en donde ΔE_s es la escorrentía superficial (o lluvia neta) que provoca el aguacero (P) en la ladera original

Distinguimos aquí entre precipitaciones total y parcialmente aprovechables por la ladera, según el valor que tome ΔE_s .

Siempre que $ANTES < PROM$ la sistematización será conveniente para la economía del agua en la ladera.

4. Ecuaciones generales

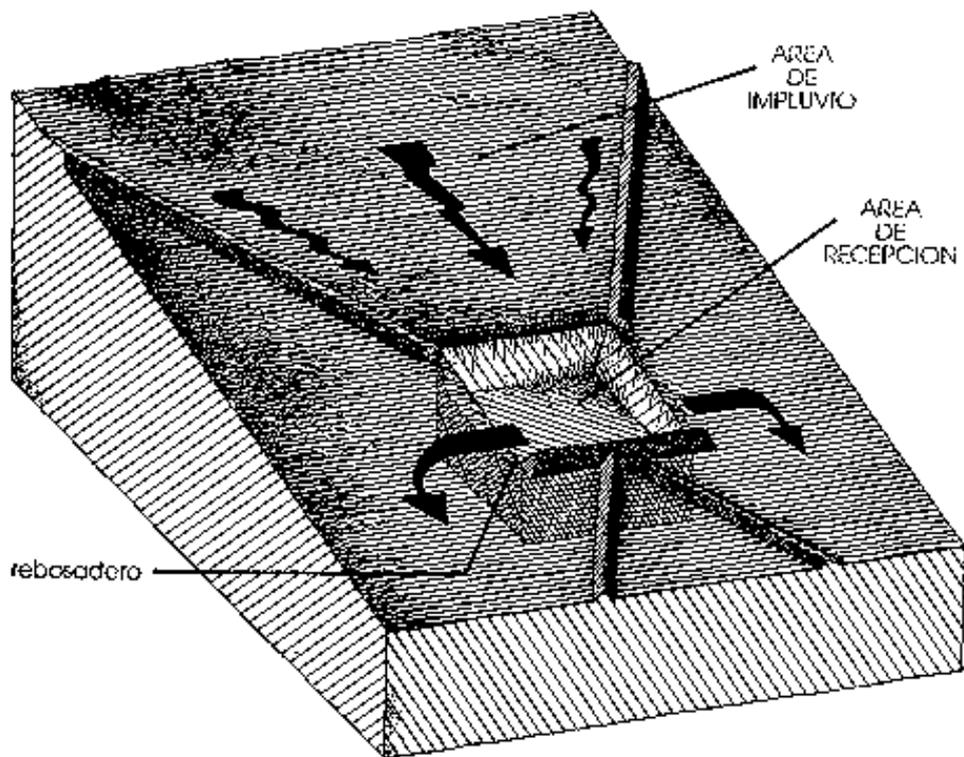
La hipótesis de independencia permite abordar el estudio de una sistematización primaria individualizando su estructura o unidad tipo. En este apartado vamos a analizar el comportamiento hidrológico de una unidad sistematizada ante un aguacero. Para ello hemos de definir las características físicas y topográficas de la estructura primaria proyectada y las del aguacero.

Para definir un episodio de lluvia basta con conocer su banda pluviográfica o su yetograma. Prescindimos de la intercepción cuyo efecto va a ser despreciable en un terreno degradado. Tampoco vamos a considerar la evaporación que se pueda producir desde los charcos que se formen por el aguacero antes de que se infiltren.

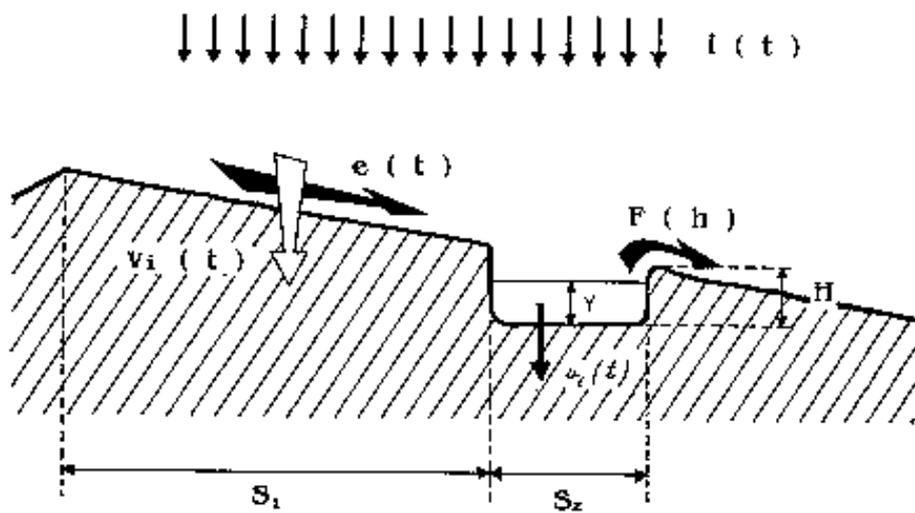
Cualquier unidad sistematizada se compone de un área de impluvio y de un área de recepción. Con el fin de facilitar la exposición nos vamos a fijar en una microcuenca. Se trata de la sistematización del terreno que mejor se ajusta a los planteamientos e hipótesis del modelo, pero en modo alguno hay que limitar su uso a este tipo de preparación del suelo. Para terrazas y caballones de absorción y también para subsolados lineales o cruzados podemos aplicar el modelo como ya tendremos ocasión de comentar más adelante.

Para poder describir el comportamiento de una microcuenca desde el punto de vista de la Hidrología de Superficie hay que conocer los siguientes parámetros de la misma:

- * la superficie del área de impluvio (S_1)
- * la superficie del área de recepción (S_2)
- * la capacidad de infiltración del área de impluvio ($f(t)$)
- * la capacidad de infiltración del área de recepción ($f(t)$)
- * la capacidad máxima del microembalse (CAPA)
- * la ecuación de descarga para las demasías de agua ($F(h)$)



Perspectiva de una microcuena



Esquema conceptual de funcionamiento de una microcuena con poceta

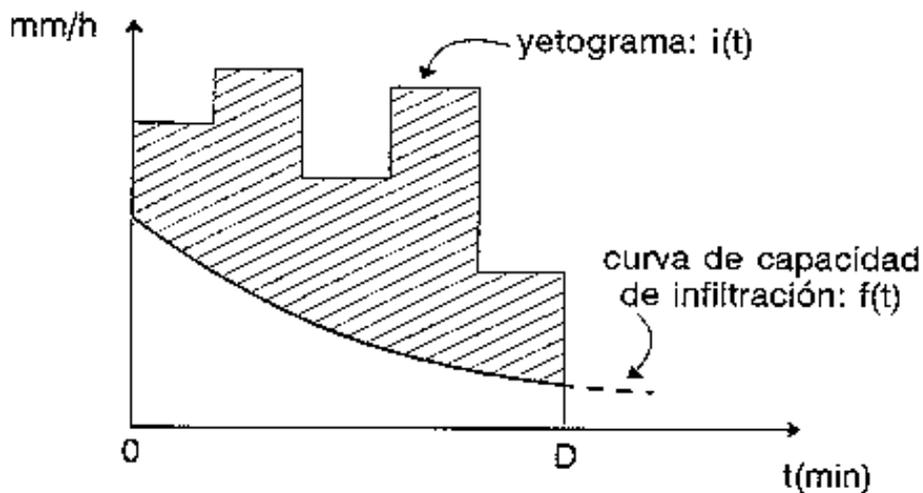
En el área de impluvio y por confrontación del yetograma ($i(t)$) con la curva de capacidad de infiltración ($f(t)$) obtenemos el yetograma neto que nos da la cantidad de lluvia que se convierte en escorrentía superficial. De esta forma podemos deducir el volumen de escorrentía superficial que genera el aguacero y el volumen de agua que se infiltra en el terreno.

La velocidad de infiltración (v_i) coincide con la intensidad de lluvia si el suelo no está encharcado y es igual a la capacidad de infiltración (f) si el suelo presenta charcos (es decir: una vez se ha alcanzado el tiempo de encharcamiento)

$$v_i(t) = \begin{cases} i(t) & [\text{si el suelo no está encharcado}] \\ f(t) & [\text{si el suelo está encharcado}] \end{cases}$$

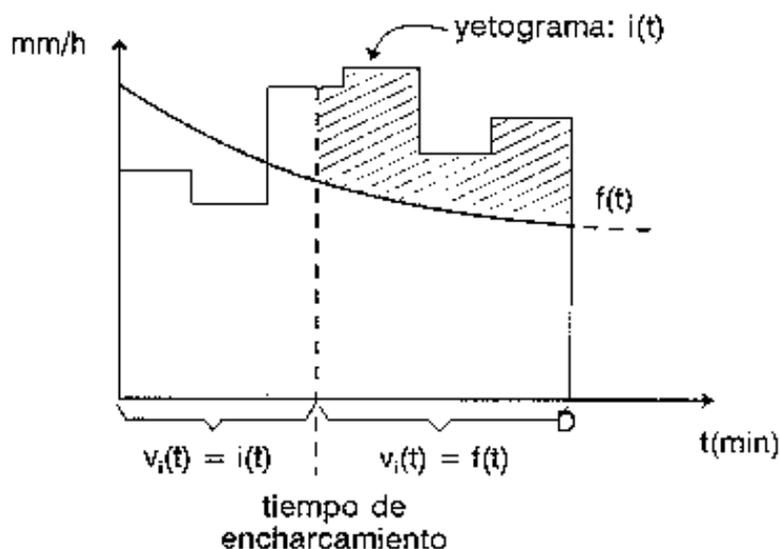
Para un aguacero intenso, en el que la intensidad de lluvia sea en todo momento mayor que la capacidad de infiltración del suelo, la obtención del hietograma neto es inmediata; basta con restar para cada abscisa del gráfico adjunto la intensidad de lluvia de la capacidad de infiltración del suelo. De esta manera se obtiene la intensidad de escorrentía generada por el aguacero [$e(t)$].

$$e(t) = i(t) - f(t) \quad [\text{en mm/h}]$$



En este caso: $v_i(t) = f(t)$

La situación antes descrita es bastante inusual. Casi todos los episodios de lluvia tienen al menos una fase inicial en la que la capacidad de infiltración excede a la intensidad de lluvia [$f(t) > i(t)$]. En estos casos hay que hallar el tiempo (o los tiempos) de encharcamiento para conocer los periodos de tiempo en que la intensidad de infiltración se rige por la intensidad de lluvia y los momentos en que se rige por la capacidad de infiltración del suelo.



Sin la necesidad de detenernos en la definición matemática del tiempo de encharcamiento, podemos establecer de forma general que:

$$e(t) = i(t) - v_i(t) \quad [\text{en mm/h}]$$

siendo $v_i(t)$ la velocidad de infiltración en el área de impluvio.

La disponibilidad hídrica en el área de impluvio se corresponde con el volumen de agua infiltrado, o sea: con el volumen de agua llovido menos el volumen de agua que ha escurrido superficialmente.

$$\boxed{\text{FIMP} = \int_0^D v_i(t) \cdot dt = \int_0^D [i(t) - e(t)] \cdot dt} \quad [\text{en mm}] \quad [7]$$

siendo D la duración del aguacero.

Como se deduce por la ecuación anterior, no contemplamos la posibilidad de que el proceso de infiltración se prolongue por más tiempo que la duración del aguacero, es decir: suponemos un área de impluvio sin depresiones que puedan haber almacenado agua. Tampoco consideramos la posibilidad de que una parte de la lluvia neta surgida en un periodo de tiempo pueda infiltrar en el mismo área de impluvio ante una disminución de la intensidad de lluvia, por ser el tiempo de tránsito hasta el área de recepción muy pequeño. En definitiva y a nivel práctico, suponemos que toda la lluvia neta generada por el aguacero en el área de impluvio llega al área de recepción como escorrentía superficial. En consecuencia:

$$E_{s1} = S_1 \cdot \int_0^D e(t) \cdot dt \quad (\text{en l}) \quad [8a]$$

siendo E_{s1} el volumen de escorrentía superficial generado por el aguacero en el área de impluvio y que alimenta al área de recepción. Si se desea dar este resultado en litros por metro cuadrado de área receptora, habrá que escribir:

$$\boxed{E_{s1} = \frac{S_1}{S_2} \cdot \int_0^D e(t) \cdot dt} \quad [\text{en l/m}^2] \quad [8b]$$

El área colectora funciona como un microembalse. La banqueta hace las veces de vaso del embalse, unas represas de tierra o la propia contrapendiente de la plataforma sirven para retener el agua y un rebosadero a modo de aliviadero de demasías en algún lugar apropiado componen el modelo reducido de nuestra presa forestal contra la desertificación. La capacidad máxima de embalse de la estructura (CAPA) se deduce a partir del relieve del área de recepción: la altura de los caballones o la profundidad de la poceta (H) permiten su estimación.

La ecuación de continuidad a establecer en el microembalse tiene por expresión:

$$\frac{dv}{dt} = \text{I} - \text{Q}$$

en donde $\left\{ \begin{array}{l} \frac{dv}{dt} \text{ es la variación del volumen de agua acumulado} \\ \text{en el microembalse} \\ \text{I es el caudal de entrada al área de recepción} \\ \text{Q es el caudal de salida fuera del embalse} \end{array} \right.$

Por sencillas consideraciones se pueden determinar las entradas (I) y las salidas (Q) del sistema hidrológico durante un aguacero;

$$\text{I} = i(t) \cdot S_2 + e(t) \cdot S_1$$

$$\text{Q} = v_i(t) \cdot S_2 + F(h)$$

siendo: $v_i(t)$ la tasa o velocidad de infiltración en el área de recepción

$F(h)$ el caudal de salida a través del vertedero o rebosadero de la estructura y que es función de la carga de vertido (h)

En consecuencia, se cumple la siguiente ecuación de continuidad:

$$\frac{dv}{dt} = i(t) \cdot S_2 + e(t) \cdot S_1 - v_i(t) \cdot S_2 - F(h) \quad [9]$$

Vamos a hacer ciertas precisiones y comentarios sobre los términos de la ecuación anterior:

a) Dentro del área de recepción podemos distinguir la superficie anegada [S] de la que no lo está [$S_2 - S$]. La superficie anegada será función del calado de la lámina de agua (y) que haya sobre el área colectora, e.d.: $S = S(y)$.

b) La variación del volumen de agua almacenado en el microembalse puede expresarse en función del calado y de la

superficie anegada:

$$dV = S(y) \cdot dy$$

c) Vertido de demasías

Si el volumen de agua no puede ser retenido en el área de recepción, los excedentes son evacuados a través de la sistematización secundaria. Esta red de desagüe comienza a funcionar una vez que el calado (y) ha superado la altura (H) de las represas de tierra que impiden tal circulación. A la diferencia entre la cota de agua y la altura de los muretes se la denomina carga de vertido ($h = y - H$).

Para ser más exactos:

$$h = \begin{cases} 0 & \text{si } y \leq H \\ y - H & \text{si } y > H \end{cases}$$

La carga de vertido (h) se interpreta en Hidráulica como la energía específica (por unidad de peso) que tiene el agua para acceder y circular por la sistematización secundaria.

En el caso de un microembalse, el rebosadero funciona como un vertedero (o aliviadero). La ecuación de descarga adopta la siguiente expresión:

$$\begin{cases} F(h) = 0 & \text{si } h = 0 \\ F(h) = k \cdot h^x = c \cdot L \cdot h^{1,5} & \text{si } h > 0 \end{cases}$$

en donde: k y c son coeficientes de gasto (o de descarga);
constantes

x es un exponente de descarga que vale 1,5 para
vertidos no sumergidos

L es el ancho medio del rebosadero

h es la carga de vertido

En el caso de una cuenca lineal delimitada por una terraza en contrapendiente o por un caballón, la ecuación de descarga coincide con la curva de gasto del canal creado. Si conocemos la pendiente longitudinal (i), la rugosidad (n) y la sección transversal (S) del canal estaremos en condiciones de estimar la curva $F(h)$, por ejemplo a través de la ecuación de Manning:

$$F(h) = \frac{1}{n} \cdot [R_h]^{0,6} \cdot \sqrt{r} \cdot S$$

en donde R_h es el radio hidráulico de la sección mojada (\mathcal{S}).

El estudio del flujo en el canal de desagüe de la cuenca de contorno puede precisarse más si es tratado como régimen progresivamente creciente, pero para los fines que perseguimos basta con esta mención; ¡que no por más prolijo ha de ser el modelo mejor!

d) El volumen de agua almacenado en el microembalse en un instante dado (V) puede ser mayor o menor que CAPA. Si es mayor que el volumen máximo se estará produciendo un vertido a través del rebosadero.

$$V \overset{?}{\leftrightarrow} \text{CAPA}$$

Se cumplen las siguientes condiciones de borde para la función de almacenamiento (o de embalse, $V = f(y)$):

$$\begin{aligned} V &= 0 && \text{si } y = 0 \\ V &= \text{CAPA} && \text{si } y = H \\ [V &\approx \text{CAPA} + S_2 \cdot h && \text{si } y = H + h] \end{aligned}$$

e) tasas de infiltración

La velocidad de infiltración en el área receptora (v_i) coincide con la capacidad de infiltración del terreno (f) nada más aparezcan las primeras zonas anegadas. Con anterioridad la velocidad de infiltración viene regida por la cantidad de agua que llega al área de recepción, tanto desde el área de impluvio como directamente desde el aguacero. Así:

$$v_i(t) = \begin{cases} i(t) + \frac{e(t) \cdot S_1}{S_2} & \text{[si el suelo no está encharcado]} \\ f(t) & \text{[si el suelo está encharcado]} \end{cases}$$

La capacidad de infiltración del área de recepción y del área de impluvio no tienen por qué ser iguales. Una correcta preparación del suelo cuando esté a tempero o la aplicación de enmiendas en el área de recepción pueden aumentar su capacidad de infiltración ($f(t)$) en comparación con la del terreno original

de la ladera. Por otro lado, una compactación y un alisado del suelo o el empleo de sustancias que promuevan la escorrentía en el área de impluvio pueden conseguir incrementos importantes en la recolección de agua por disminución de $f(t)$.

Siempre será muy conveniente que la capacidad de infiltración en el área de recepción sea mayor que en el área de impluvio.

$$f(t) > f(t)$$

De lo contrario, la preparación del suelo corre el riesgo de resultar desfavorable para la economía del agua en el área de recepción - a no ser que creemos pocetas o microembalses con el tamaño suficiente para corregir la mencionada tendencia.

Si retomamos la ecuación de continuidad planteada para el microembalse [ec. 9];

$$\frac{dv}{dt} = i(t) \cdot S_2 + e(t) \cdot S_1 - v_i(t) \cdot S_2 - F(h)$$

y si sustituimos ciertas expresiones por sus correspondientes desarrollos, nos queda la ecuación diferencial del microembalse:

$$\frac{S(y) \cdot dy}{dt} = i(t) \cdot S_2 + [i(t) - v_i(t)] \cdot S_1 - v_i(t) \cdot S_2 - c \cdot L \cdot (y-H)^{1,5} \quad [10]$$

Se trata de una ecuación diferencial no separable. Su integración sólo va a ser posible bajo determinados supuestos que más adelante desarrollaremos.

La disponibilidad hídrica en el área de recepción se corresponde con el volumen de agua infiltrado durante el aguacero más el volumen de agua acumulado al final del chubasco (V_f) menos el volumen de agua que hubiera al comienzo del mismo en el microembalse (V_i).

$$DESP = \int_0^D v_i(t) \cdot dt + \frac{V_f - V_i}{S_2} \quad [\text{en mm}]$$

El volumen inicial valdrá cero ($V_i = 0$ l) salvo que consideremos dos aguaceros muy cercanos en el tiempo, de manera que el agua almacenada del algarazo previo no haya tenido tiempo

de infiltrarse cuando se inicia el segundo chubasco. Este hecho ($V_i \neq 0$) también se puede producir, pese a que hayan transcurrido varios días sin llover, en terrenos altamente impermeables. En tal caso la conveniencia de la sistematización es bastante dudosa ya que el repoblado puede tener serios problemas de aireación en sus raíces.

Para conocer el volumen de agua almacenado al final del aguacero (V_f) hay que integrar la ecuación diferencial del microembalse entre el comienzo y el final de la lluvia.

Para $t = 0 \quad \rightarrow \quad y = 0 \quad (\text{si } V_i = 0)$

Para $t = D \quad \rightarrow \quad y = y_f \quad (\text{incógnita buscada que nos permite deducir } V_f)$

Una restricción razonable consiste en admitir que $V_f \leq \text{CAPA}$, o lo que es lo mismo: $y_f \leq H$. Ello equivale a suponer que el desagüe del líquido que queda sobre el umbral del vertedero al final del aguacero es inmediato, es decir; que el tiempo final de vertido (de rebosadura) es nulo: $t_v = 0$.

Si se desea contabilizar el efecto que tiene este agua excedentaria sobre la disponibilidad hídrica en el área de recepción, hay que conocer el tiempo final de vertido. El límite superior de integración debe ser posterior al final del aguacero en los minutos correspondientes al mencionado lapso de tiempo. Así, la ecuación precisa para determinar las disponibilidades hídricas del área de recepción es la siguiente:

$$\text{DESP} = \int_0^{D+t_v} \phi_i(t) \cdot dt + \frac{V_f - V_i}{S_2} \quad [\text{en mm}] \quad [11]$$

con $V_f \leq \text{CAPA}$

Para hallar el tiempo de rebosadura una vez finalizado el chubasco (t_v), la ecuación que resuelve el problema es una particularización del balance establecido para el microembalse [ec 10]. En concreto:

$$S(y) \cdot dy = - \left[\phi_i(t) \cdot S_2 + c \cdot L \cdot (y-H)^{1,5} \right] \cdot dt \quad [10b]$$

Integrando entre el comienzo ($y = y_f$; $t = D$) y el final del proceso ($y = H$; $t = D + t_v$) obtendremos el tiempo final de vertido (t_v).

.....

Otro método para obtener la disponibilidad hídrica en el área de recepción consiste en desarrollar la expresión:

$$DESP = P + E_{s1} - E_{s2} \quad [3]$$

El volumen de agua aportado por el área de impluvio al área de recepción, calculado anteriormente, vale:

$$E_{s1} = \frac{S_1}{S_2} \cdot \int_0^D e(t) \cdot dt \quad [8]$$

El volumen de agua que escapa de la unidad sistematizada (en litros por metro cuadrado de área colectora) se deja expresar por medio de la integral:

$$E_{s2} = \frac{1}{S_2} \cdot \int_0^{D+t_v} F(h) \cdot dt \quad [12]$$

Durante los periodos de tiempo en que el calado (y) resulta menor que la altura de las represas (H), el volumen desaguado a través del rebozadero será nulo. Sólo en los momentos en que $y > H$ se produce un vertido fuera de la unidad. Para conocer estos periodos de tiempo hay que resolver la ecuación diferencial del microembalse.

Si sustituimos las dos últimas expresiones en la ecuación fundamental [$DESP = P + E_{s1} - E_{s2}$], nos queda:

$$DESP = P + \frac{S_1}{S_2} \cdot \int_0^D e(t) \cdot dt - \frac{1}{S_2} \cdot \int_0^{D+t_v} F(h) \cdot dt \quad [\text{en mm}] \quad [13]$$

en donde: P es la precipitación del aguacero; $P = \int_0^D i(t) \cdot dt$
 S_1 es la superficie del área de impluvio

S_2 es la superficie del área de recepción
 D es la duración del aguacero
 $e(t)$ es la escorrentia superficial generada en el área de impluvio; $e(t) = i(t) - v_i(t)$
 t_v es el tiempo final de vertido (o de rebosadura)
 $F(h)$ es la ecuación de descarga de las demasías fuera de la unidad sistematizada

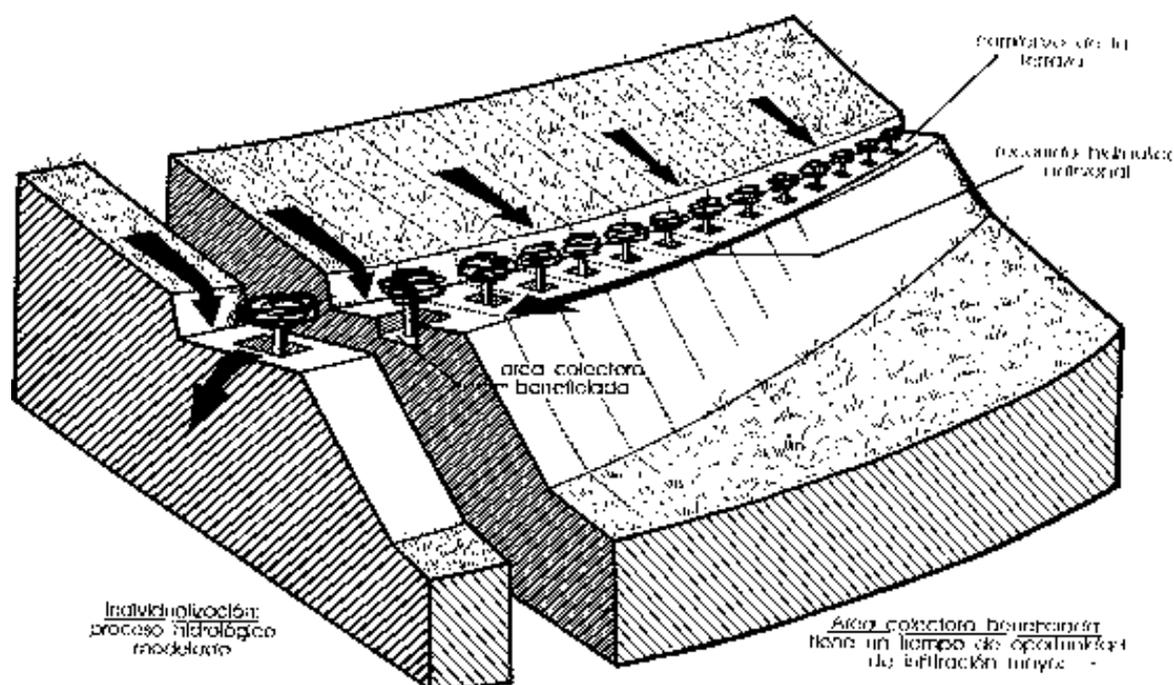
La disponibilidad hídrica media que genera el aguacero en la unidad sistematizada se calcula mediante la conocida ecuación:

$$\text{PROM} = \frac{S_1 \cdot \text{PIMP} + S_2 \cdot \text{DESP}}{S_1 + S_2} \quad [\text{en mm}] \quad [5]$$

Este valor también representa la infiltración media provocada por el chubasco en la ladera, de acuerdo con la hipótesis de independencia.

Se trata de un índice que infravalora la disponibilidad hídrica de la ladera en ciertas ocasiones, ya que no contempla la posibilidad de que parte de los excedentes de agua se infiltren durante su camino a través de la sistematización secundaria. Es un hecho incuestionable que las unidades dominadas reciben más agua que las unidades superiores al tener un tiempo de oportunidad de infiltración mayor. Este fenómeno sólo se produce para aguaceros que exceden a la precipitación límite. Para el resto de aguaceros, como ya sabemos, la disponibilidad promedio coincide con la lluvia registrada [$\text{PROM} = P$].

Cualquier punto de la ladera que pertenezca a la sistematización secundaria se verá enriquecido por la infiltración de parte del agua excedentaria que escapa de las unidades individuales. En el caso de las terrazas o de los caballones de absorción son las últimas áreas de recepción al final de la cuenca de contorno quienes se ven más favorecidas por tal fenómeno; en el caso de una sistematización con microcuencas serán las unidades bajas las beneficiadas.



Para cuantificar este fenómeno en un punto concreto de la ladera basta con identificar el recorrido hidráulico superficial más largo que une la divisoria con el mencionado punto y estimar el tiempo que tarda la gota más alejada en alcanzar el lugar analizado. Determinado este tiempo de concentración (T_c) conocemos el tiempo de oportunidad de infiltración adicional que posee el lugar y que estará incrementando su disponibilidad hídrica con respecto a las fórmulas que hemos desarrollado.

Este tiempo de concentración multiplicado por la tasa de infiltración media nos cuantifica el volumen de agua adicional infiltrado en el lugar con relación al obtenido por las fórmulas generales que proponemos.

En todo caso y antes de finalizar este capítulo, conviene insistir de nuevo en el objetivo fundamental que perseguimos con este trabajo: lo que buscamos es una metodología práctica para diseñar sistematizaciones primarias adecuadas a la supervivencia del repoblado en regiones áridas. Es así que debemos situarnos en las unidades más desfavorecidas aún a sabiendas de que ciertos lugares dispondrán de más humedad.

5. Etapas de funcionamiento de un microembalse

Al inicio de un chubasco tanto el área de impluvio como el área de recepción suelen ser capaces de infiltrar todo el agua que precipita [$i(t) \leq f(t)$ y $i(t) \leq \lambda(t)$]. Transcurrido un cierto tiempo se alcanza el punto de encharcamiento en el área de impluvio. A partir de este momento el sistema empieza a producir escorrentía para el área de recepción. El episodio de lluvia resulta rentable para la economía del área colectora, que se ve enriquecida con aguas ajenas además de las pluviales que le son propias.

El encharcamiento del área receptora puede demorarse o adelantarse a la llegada de las aguas de escorrentía donadas por el área de impluvio. Cabe distinguir así dos puntos de encharcamiento: uno correspondiente al área productora (t_i) y que define el instante en el que la lluvia empieza a ser eficaz a la sistematización planteada; el otro correspondiente al área de recepción (t_r) y que marca el comienzo de llenado del microembalse.

Siempre que la capacidad de infiltración del área de impluvio sea menor que la capacidad de infiltración del área de recepción, la formación de escorrentía en la primera zona se adelantará con respecto a la aparición de los primeros charcos en la segunda ($t_i < t_r$). Esta situación denota una mayor capacidad de acogida de agua por parte del área de recepción, lo que resulta ventajoso para los objetivos perseguidos: sin necesidad de crear una represa o poceta la disponibilidad hídrica del área colectora tiende a ser mayor que la del área de impluvio.

El funcionamiento del microembalse queda reflejado en la ecuación diferencial que hemos desarrollado en el tema anterior [ec. 10]. Para un aguacero sencillo que sea mayor que la precipitación límite, cabe distinguir cuatro situaciones diferentes que se corresponden con otras tantas particularizaciones de la mencionada ecuación: una fase inicial de

llenado sin vertido, una segunda etapa de llenado con rebosadura, una tercera fase de vaciado con rebosadura tras la conclusión del aguacero, y - por último - una fase de vaciado sin vertido hasta que concluye la infiltración del agua almacenada. Para aguaceros complejos en los que se produzcan importantes variaciones de la intensidad de lluvia podrá haber etapas intermedias de vaciado y/o llenado.

La fase inicial de llenado sin vertido se describe mediante la ecuación:

$$S(y) \cdot dy = [i(t) \cdot S_2 + [i(t) - v_i(t)] \cdot S_1 - v_i(t) \cdot S_2] \cdot dt \quad [10a]$$

La etapa de llenado con rebosadura o cualquier fase intermedia en la que se produzca vertido queda reflejada en la ecuación general del microembalse [ec. 10]:

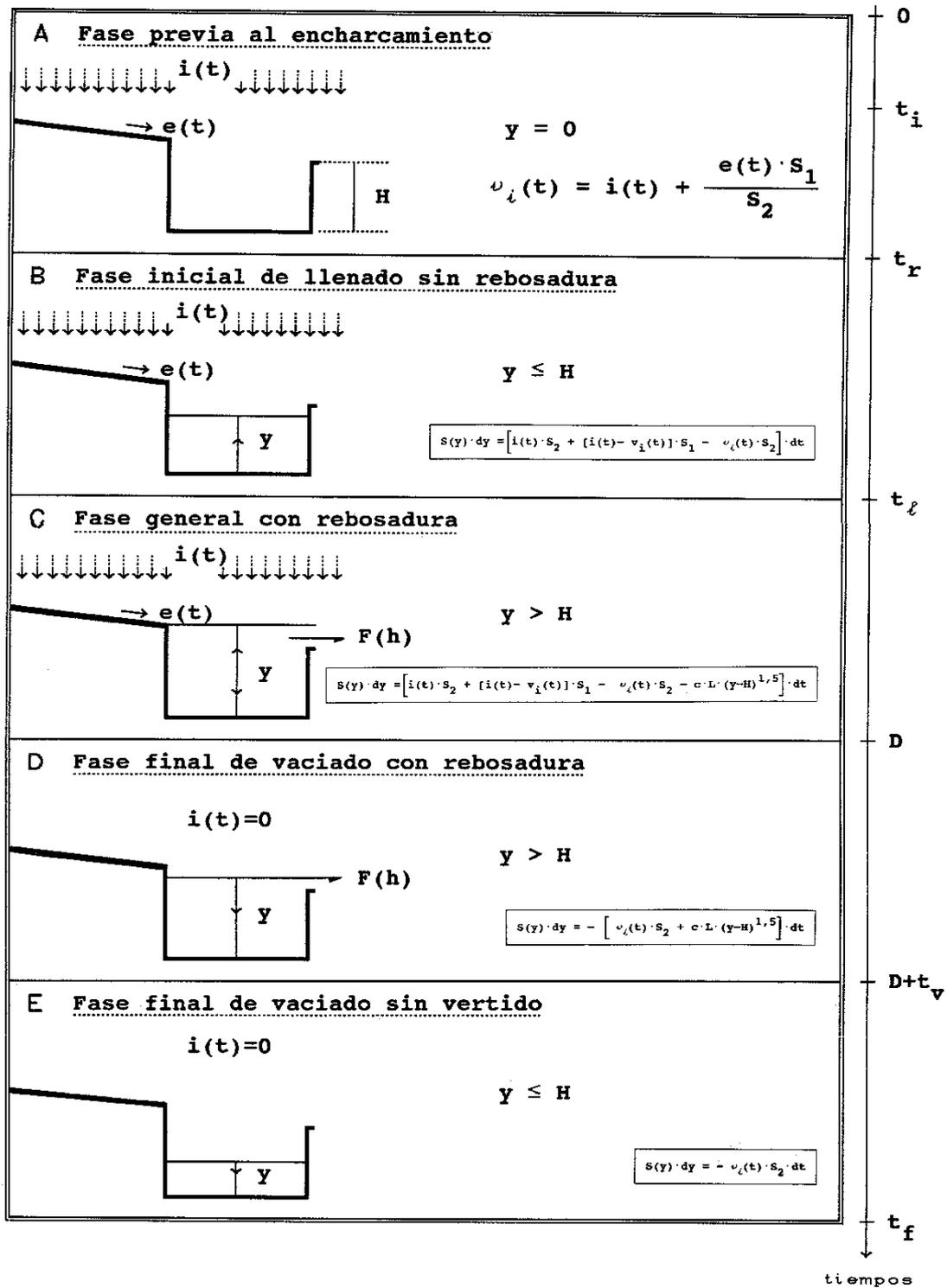
$$S(y) \cdot dy = [i(t) \cdot S_2 + [i(t) - v_i(t)] \cdot S_1 - v_i(t) \cdot S_2 - c \cdot L \cdot (y-H)^{1,5}] \cdot dt$$

La etapa de vaciado con rebosamiento a la conclusión del aguacero adopta la siguiente expresión:

$$S(y) \cdot dy = - [v_i(t) \cdot S_2 + c \cdot L \cdot (y-H)^{1,5}] \cdot dt \quad [10b]$$

En último término, la etapa final de vaciado sin vertido cumple la ecuación:

$$S(y) \cdot dy = - v_i(t) \cdot S_2 \cdot dt \quad [10c]$$



Las ecuaciones generales desarrolladas en el capítulo anterior pueden concretarse para distintas sistematizaciones y aguaceros. Los diferentes casos que cabe plantear son muy numerosos y se obtienen por combinación de las siete (u ocho) variables de entrada que tiene el problema planteado: la superficie del área de impluvio (S_1) y del área de recepción (S_2) así como la capacidad máxima del microembalse (CAPA) son constantes mientras que el resto de parámetros varían con el tiempo. La velocidad de infiltración del área productora ($v_f(t)$) y del área colectora ($v_c(t)$), la ecuación de descarga de las demasías ($F(h)$), y la superficie anegada en el microembalse ($S(y)$) dependen de la intensidad de lluvia ($i(t)$) y están interrelacionados a través de la tan mencionada ecuación diferencial [ec. 10].

Se comprende que las particularizaciones posibles sean poco menos que incontables, razón por la que tan sólo vamos a poder esbozarlas para pasar después a desarrollar los casos prácticos que resulten de mayor interés.

A nivel de aguacero cabe trabajar con yetogramas de chubascos realmente acaecidos o - por el contrario - con precipitaciones sintéticas que posean alguna significación estadística que convenga analizar. (véase el anexo I). La particularización más sencilla consiste en trabajar con aguaceros de intensidad constante ($i(t) = k$).

Para caracterizar el proceso de infiltración en el área de impluvio y en el área de recepción caben distintas posibilidades: desde trabajar directamente con los datos experimentales obtenidos sobre el terreno con infiltrómetros o con simuladores de lluvia hasta utilizar modelos generales muy sencillos y semicalibrados, como por ejemplo el método del número de curva, o trabajar con tasas de infiltración constantes (vg. la capacidad de infiltración media para un determinado lapso de tiempo). Una solución intermedia consiste en ajustar los valores experimentales obtenidos a ciertos modelos de infiltración (ecuación de Horton, o de Kostiaikov, o de Philip, etc.). A este respecto conviene indicar que aquéllos modelos que fijan la capacidad de

infiltración en función del tiempo y del volumen de agua precedente infiltrado (ecuación de Green - Ampt, o de Holtan, etc.) no resultan útiles para este estudio ya que precisan de un dato de entrada que es la incógnita principal que buscamos.

La rebosadura de agua, de producirse, sigue la ecuación de descarga a través de un vertedero, es decir:

$$F(h) = k \cdot h^x = c \cdot L \cdot h^{1,5}$$

como ya concretamos con anterioridad.

Una hipótesis simplificada de trabajo consiste en admitir que el vertido de las demasías es instantáneo nada más el agua alcanza la coronación del rebosadero.

Por último, la superficie anegada (o el volumen de agua almacenado en la microdepresión) son muy sencillos de conocer bajo la suposición de horizontalidad de la superficie libre del agua. Basta con conocer el calado y la topografía del vaso del microembalse para tener resuelta la cuestión. Una simplificación que vamos a contemplar es la de suponer que la superficie anegada es constante y que coincide con el área de recepción en todo momento:

$$S(y) = cta = S_2$$

6. Particularización de las ecuaciones generales al modelo de infiltración de Horton para una intensidad de lluvia constante

6.1. Introducción

En este extenso capítulo vamos a concretar las ecuaciones generales a un caso que consideramos de sumo interés tanto a nivel teórico como práctico: el comportamiento hidrológico de una unidad sistematizada (como por ejemplo, una microcuenca) ante un aguacero de intensidad constante.

Para definir las características de infiltración en la microcuenca utilizaremos el modelo de Horton, distinguiendo dos curvas de infiltración: una correspondiente al área de impluvio y la otra referida al área de recepción. Usamos la ecuación de Horton por tratarse del modelo más conocido, porque permite un tratamiento matemático e informático relativamente sencillos y porque se suele ajustar bastante bien a los datos experimentales de campo.

Pensamos que las ecuaciones que resuelven este problema y que ahora pasamos a exponer, constituyen un modelo hidrológico con un marcado interés dentro de nuestro ámbito forestal, ya que posibilitan el diseño técnico de estructuras de recolección de agua para la repoblación en ladera (llámense terrazas de absorción, cuencas de contorno o microcuencas). Para facilitar su uso, la metodología se ofrece informatizada al final de este capítulo (programa HYDNUM).

6.2. Desarrollo matemático del modelo

Como la tarea que tenemos en perspectiva parece un tanto prolija, vamos a abordarla de forma ordenada siguiendo las fases de funcionamiento establecidas para una unidad sistematizada.

A

Fase previa al encharcamiento

La etapa previa a la formación de escorrentía en el área de impluvio queda caracterizada por una tasa de infiltración que coincide con la intensidad de lluvia [$v_i(t) = i(t)$]. Esta etapa se prolonga hasta el instante t_i en el que se alcanza el tiempo de encharcamiento. Si suponemos un aguacero de intensidad constante [$i(t) = k$] y duración inferior al mencionado lapso de tiempo [$D < t_i$] estamos ante una precipitación débil en la que el área de impluvio no aporta escorrentía al área colectora. Por el contrario, si el aguacero dura más que el tiempo de encharcamiento, la sistematización primaria empezará a cumplir su finalidad.

Con el fin de concretar, vamos a suponer que la capacidad de infiltración en el área de impluvio sigue el conocido modelo empírico de Horton:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot t}$$

en donde sus tres parámetros (capacidad de infiltración inicial [f_0]; capacidad de infiltración final [f_c] y exponente de disminución [α]) han sido ajustados a los valores experimentales obtenidos en el ensayo de infiltración realizado.

(Véase el anexo II.)

Si la intensidad de lluvia (k) es mayor que la capacidad de infiltración inicial (f_0) el aguacero genera escorrentía superficial en el área de impluvio de forma instantánea, es decir: su tiempo de encharcamiento es nulo ($t_i = 0$). El caso extremo opuesto se produce con una intensidad de lluvia inferior a la capacidad de infiltración final ($k \leq f_c$), situación que no generará escorrentía (nunca se alcanza t_i). Pero lo más frecuente es que tengamos una intensidad de lluvia comprendida

entre las tasas de infiltración inicial y final ($f_0 < k < f_c$).

La obtención del tiempo de encharcamiento (t_i) para este caso viene desarrollada en el anexo II. La ecuación que resuelve es:

$$t_i = \frac{1}{\alpha \cdot k} \cdot \left[f_0 - k + f_c \cdot \ln \frac{f_0 - f_c}{k - f_c} \right] \quad [14a]$$

Por otro lado y de acuerdo con el citado anexo, la velocidad de infiltración del terreno tras el encharcamiento sigue la ley exponencial:

$$v_i(t) = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot (t - \Delta t)} \quad [15]$$

expresión que es idéntica a la original de Horton, sólo que incorpora un desplazamiento temporal Δt . Este cambio cronológico viene definido por las dos igualdades siguientes:

$$\Delta t = t_i - t_s \quad [16]$$

$$t_s = - \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \frac{k - f_c}{f_0 - f_c} \quad [17]$$

Con estos datos estamos en disposición de calcular el volumen de agua infiltrado en el área de impluvio como consecuencia del aguacero (de intensidad constante y duración superior al tiempo de encharcamiento: $D > t_i$). De acuerdo con la ecuación [7]:

$$PIMP = \int_0^D v_i(t) \cdot dt = \int_0^{t_i} k \cdot dt + \int_{t_i}^D \left[f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot (t - \Delta t)} \right] \cdot dt$$

$$PIMP = k \cdot t_i + f_c \cdot (D - t_i) + \frac{1}{\alpha} \cdot (f_0 - f_c) \cdot e^{\alpha \cdot \Delta t} \cdot e^{-\alpha \cdot t_i} - \left[\frac{1}{\alpha} \cdot (f_0 - f_c) \cdot e^{\alpha \cdot \Delta t} \cdot e^{-\alpha \cdot D} \right]$$

[18]

La aportación de agua del área de impluvio al área de recepción se calcula mediante la expresión [ec. 8a]:

$$E_{s1} = S_1 \cdot \int_0^D e(t) \cdot dt$$

En este caso:

$$E_{s1} = S_1 \cdot \int_{t_i}^D [k - f_c - (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot (t - \Delta t)}] \cdot dt$$

Al integrar la ecuación, nos queda:

$$E_{s1} = \left[(k - f_c) \cdot (D - t_i) + \frac{1}{\alpha} \cdot (f_0 - f_c) \cdot e^{\alpha \cdot \Delta t} \cdot e^{-\alpha \cdot D} - \frac{1}{\alpha} \cdot (f_0 - f_c) \cdot e^{\alpha \cdot \Delta t} \cdot e^{-\alpha \cdot t_i} \right] \cdot S_1$$

[19]

B

Fase inicial de llenado sin rebosadura

Antes de obtener la ley de llenado del microembalse, vamos a calcular el momento en el que se inicia tal proceso, es decir: el tiempo de encharcamiento del área de recepción (t_r). Si este instante precede a la formación de escorrentía en el área de impluvio ($t_r < t_i$), la ecuación que resuelve es la que hemos visto con anterioridad, sólo que referida al área colectora:

$$t_r = \frac{1}{\beta \cdot k} \cdot \left[g_0 - k + g_c \cdot \ln \frac{g_0 - g_c}{k - g_c} \right] \quad [14b]$$

siendo: g_0 la capacidad de infiltración inicial } del modelo de
 g_c la capacidad de infiltración final } Horton ajustado
 β el exponente de decrecimiento } al área receptora

Si el tiempo de encharcamiento del área de recepción es posterior al del área de impluvio ($t_r > t_i$), nada más comienzan las aportaciones de agua de la superficie productora se altera la intensidad de lluvia equivalente que recibe el área colectora. Una suposición razonable consiste en admitir que dicha intensidad de lluvia vale;

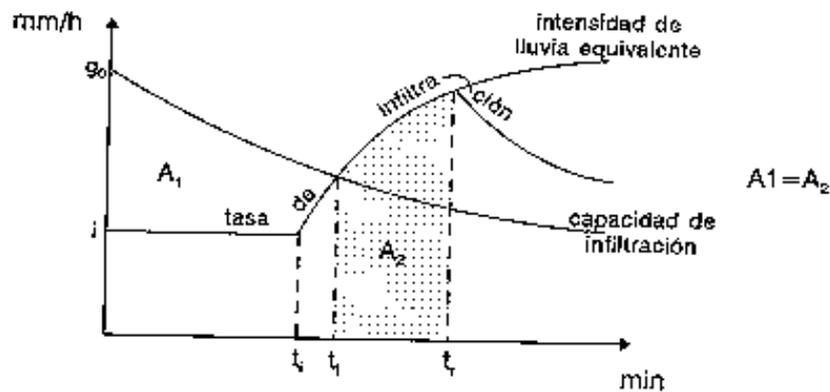
$$i(t) = k + e(t) \cdot \frac{S_1}{S_2} = k + \left[k - f_c - (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot (t - \Delta t)} \right] \cdot \frac{S_1}{S_2} \quad [20]$$

Es decir, admitimos que las aportaciones del área de impluvio se distribuyen uniformemente por todo el área de recepción.

El problema es en todo análogo al caso anterior; consiste en igualar la intensidad de lluvia con la capacidad de infiltración para obtener un tiempo auxiliar (t_t) y exigir después una compensación en volúmenes infiltrados para hallar el tiempo de encharcamiento (t_r). En el anexo II se detallan los cálculos.

Dependiendo del instante en el que se produce la intersección de la intensidad de lluvia con la curva de capacidad de infiltración las ecuaciones que resuelven son distintas:

* Primer caso: $t_t \geq t_i$ (véase la figura)



En este caso la ecuación que calcula el tiempo de encharcamiento tiene este aparatoso aspecto:

$$\left[k \cdot \left(1 + \frac{S_1}{S_2} \right) - \frac{S_1}{S_2} \cdot f_c \right] \cdot t_r + \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{S_1}{S_2} \cdot (f_0 - f_c) \cdot e^{\alpha \cdot \Delta t} \cdot e^{-\alpha \cdot t_r} =$$

$$g_c \cdot t_t - \frac{1}{\beta} \cdot (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot t_t} + \frac{1}{\beta} \cdot (g_0 - g_c) + \frac{S_1}{S_2} \cdot k \cdot t_i -$$

$$\left[\frac{S_1}{S_2} \cdot f_c \cdot t_i + \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{S_1}{S_2} \cdot (f_0 - f_c) \cdot e^{\alpha \cdot \Delta t} \cdot e^{-\alpha \cdot t_i} \right] \quad [21]$$

siendo: f_0 , f_c y α los parámetros de la ecuación de Horton para el área de impluvio

t_s , t_i y Δt tiempos relacionados con el encharcamiento del área de impluvio

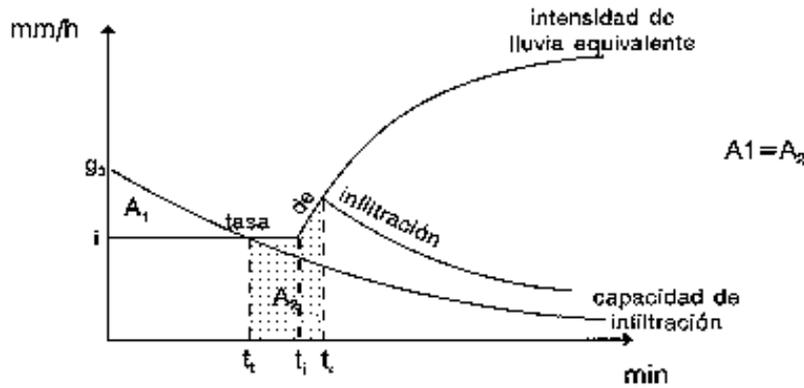
g_0 , g_c y β los parámetros de la ecuación de Horton para el área de recepción

t_r el tiempo de encharcamiento buscado (que ha de obtenerse por métodos numéricos de aproximación)

t_t un tiempo auxiliar que se calcula por medio de la siguiente igualdad:

$$(g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot t_t} + \frac{S_1}{S_2} \cdot (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot (t - \Delta t)} = k \cdot \left[1 + \frac{S_1}{S_2} \right] - f_c \cdot \frac{S_1}{S_2} - g_c \quad [22]$$

* Segundo caso: $t_t < t_i$ (véase la figura)



Las ecuaciones que resuelven son:

$$\begin{aligned}
 & (k + k \cdot \frac{S_1}{S_2}) \cdot t_r - f_c \cdot \frac{S_1}{S_2} \cdot t_r + \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{S_1}{S_2} \cdot (f_0 - f_c) \cdot e^{\alpha \cdot \Delta t} \cdot e^{-\alpha \cdot t_r} = \\
 & = (g_c - k) \cdot t_t - \frac{1}{\beta} \cdot (g_0 - g_c) \cdot (e^{-\beta \cdot t_t} - 1) - k \cdot (t_i - t_t) + (k + k \cdot \frac{S_1}{S_2}) \cdot t_i \\
 & - f_c \cdot \frac{S_1}{S_2} \cdot t_i + \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{S_1}{S_2} \cdot (f_0 - f_c) \cdot e^{\alpha \cdot \Delta t} \cdot e^{-\alpha \cdot t_i} \quad [23]
 \end{aligned}$$

siendo: f_0 , f_c y α los parámetros de la ecuación de Horton para el área de impluvio

t_s , t_i y Δt tiempos relacionados con el encharcamiento del área de impluvio

g_0 , g_c y β los parámetros de la ecuación de Horton para el área de recepción

t_r el tiempo de encharcamiento buscado (que ha de obtenerse por métodos de aproximación sucesiva)

t_t un tiempo auxiliar que se calcula por medio de la siguiente igualdad:

$$t_t = - \frac{1}{\beta} \cdot \ln \frac{k - g_c}{g_0 - g_c} \quad [24]$$

La tasa de infiltración del área colectora tras el encharcamiento vale:

$$v_i(t) = g_c + (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot (t - \sigma t)} \quad [25]$$

siendo: $\sigma t = t_r - t_t$ [26]

La obtención de la ley de llenado del microembalse ($y = f(t)$) sirve para definir precipitaciones límite. Si trabajamos con intensidades de lluvia constantes ($i(t) = k$) podemos determinar la duración límite (t_l) del aguacero de intensidad k que colmata la capacidad del microembalse ($y = H$). Si se dispone de series pluviográficas extensas, se podrá deducir la probabilidad de ocurrencia de tales episodios lluviosos, es decir: se podrá deducir la garantía que tiene la microcuenca proyectada de resultar estanca a las lluvias así como el riesgo de que la estructura se vea rebasada por los aguaceros del lugar. Los criterios de diseño de la sistematización primaria podrán detallarse con mucha precisión.

Para obtener la ley de llenado del microembalse hay que resolver la ecuación diferencial:

$$S(y) \cdot dy = \left[i(t) \cdot S_2 + [i(t) - v_i(t)] \cdot S_1 - v_i(t) \cdot S_2 \right] \cdot dt - c \cdot L \cdot (y - H)^{1,5} \cdot dt \quad [ec. 10]$$

Con el objeto de poder integrar la ecuación anterior vamos a hacer los siguientes supuestos:

- * la intensidad de lluvia es constante ($i(t) = k$)
- * la capacidad de infiltración en el área de impluvio puede ajustarse al modelo de Horton:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot t}$$

Igual ocurre en el área de recepción, de manera que:

$$f(t) = g_c + (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot t}$$

* la superficie anegada (S(y)) coincide con el área de recepción: S(y) = S₂ [como mínimo debe ser integrable la función S(y) para que se pueda resolver la ecuación diferencial]

* al comienzo del aguacero no hay volumen alguno de agua almacenado en el microembalse, es decir: para t=0 y=0 (⇔ V_i=0)

Como durante la fase de llenado del microembalse no se produce vertido de aguas, el último término de la ecuación diferencial será nulo: c · L · (y-H)^{1,5} = 0

Si sustituimos valores nos queda la siguiente ecuación:

$$S_2 \cdot dy = \left[k \cdot S_2 + \theta \cdot [k - f_c - (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot (t-\Delta t)}] \cdot S_1 \right] \cdot dt \\ \left[g_c + (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot (t-\sigma t)} \right] \cdot S_2$$

siendo: θ un factor que vale cero si t ≤ t_i y que vale uno en caso contrario.

Al integrar entre el comienzo del llenado y un instante t previo al inicio del vertido,

$$\int_0^y S_2 \cdot dy = \int_{t_r}^t \left[k \cdot S_2 + \theta \cdot [k - f_c - (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot (t-\Delta t)}] \cdot S_1 \right] \cdot dt \\ \left[g_c + (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot (t-\sigma t)} \right] \cdot S_2$$

queda finalmente:

$$y = (k - g_c) \cdot (t - t_r) + \frac{1}{\beta} \cdot (g_0 - g_c) \cdot e^{\beta \cdot \sigma t} \cdot \left[e^{-\beta \cdot t} - e^{-\beta \cdot t_r} \right] + \varphi \quad [27]$$

siendo φ una expresión que depende del factor θ.

* Si θ = 1 (es decir: si t_i ≤ t_r < D):

$$\Psi = (k - f_c) \cdot (t - t_r) \cdot \frac{S_1}{S_2} + \frac{1}{\alpha} \cdot (f_0 - f_c) \cdot e^{\alpha \cdot \Delta t} \cdot \frac{S_1}{S_2} \cdot \left[\frac{-\alpha \cdot t}{e} - \frac{-\alpha \cdot t_r}{e} \right]$$

* Si $\varnothing = 0$ hasta que $t \geq t_i$ (es decir: si $t_r < t_i$):

$$\Psi = (k - f_c) \cdot (t - t_i) \cdot \frac{S_1}{S_2} + \frac{1}{\alpha} \cdot (f_0 - f_c) \cdot e^{\alpha \cdot \Delta t} \cdot \frac{S_1}{S_2} \cdot \left[\frac{-\alpha \cdot t}{e} - \frac{-\alpha \cdot t_i}{e} \right]$$

* Si $\varnothing = 0$ durante todo el chubasco ($t_r < D \leq t_i$): $\Psi = 0$

Si imponemos que calado y altura de las represas del microembalse coincidan ($y = H$), obtendremos la duración del aguacero límite con intensidad de lluvia constante k (t_l).

$$H = (k - g_c) \cdot (t_l - t_r) + \frac{1}{\beta} \cdot (g_0 - g_c) \cdot e^{\beta \cdot \Delta t} \cdot \left[e^{-\beta \cdot t_l} - e^{-\beta \cdot t_r} \right] + \Psi \quad [28]$$

Siempre que el periodo de retorno sea grande para la intensidad / duración límite en estudio ($k \cdot t_l$), podremos concluir que la sistematización planteada funciona como una microfrecuencia endorreica ante tales intensidades de lluvia (véase el anexo I).

Por último y si en la ecuación que calcula el calado introducimos la duración del chubasco ($t = D$), hallaremos la altura mínima (YU) que deben tener las represas del microembalse para que no se produzcan vertidos fuera de la unidad sistematizada.

$$YU = (k - g_c) \cdot (D - t_r) + \frac{1}{\beta} \cdot (g_0 - g_c) \cdot e^{\beta \cdot \Delta t} \cdot \left[e^{-\beta \cdot D} - e^{-\beta \cdot t_r} \right] + \Psi \quad [29]$$

C

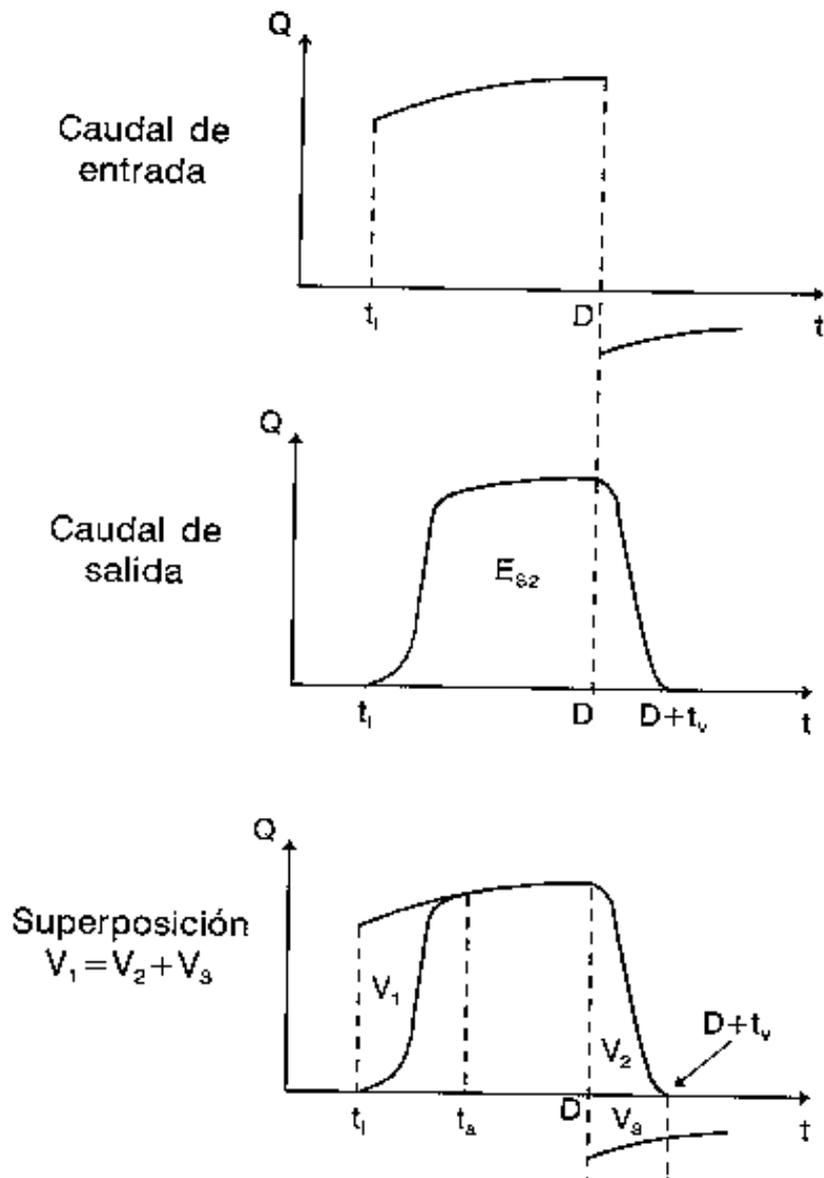
Fase de llenado con rebosadura

Si el aguacero se prolonga ($D > t_p$) se producirá un vertido de agua ($E_{s2} \neq 0$). La precipitación resulta excesiva para la sistematización planteada, que deja de funcionar como una cuenca endorreica.

El estudio de la circulación del flujo a través del microembalse puede abordarse aplicando los métodos de diferencias finitas utilizados para el tránsito de avenidas en presas (método de Runge-Kutta, método de Puls, etc.)

Con el fin de aproximarnos a la terminología de los mencionados métodos de cálculo vamos a llamar al término ' $e(t) \cdot S_1 + [i(t) - v_i(t)] \cdot S_2$ ' caudal de entrada y al término ' $F(h)$ ' caudal de salida.

Distinguimos así dos hidrogramas. El hidrograma de entrada [$Q_e(t) = e(t) \cdot S_1 + [i(t) - v_i(t)] \cdot S_2$] será creciente por ser constante la intensidad de lluvia y decrecientes las tasas de infiltración en el problema que tenemos planteado. El hidrograma de salida [$Q_s(t) = F(h)$] también es creciente hasta la conclusión del aguacero. Cabe distinguir en él tres tramos: el primero con una curva de crecida acentuada que trata de acomodarse al caudal de entrada; el segundo tramo coincide con el hidrograma de entrada; nada más acaba el aguacero comienza la disminución del caudal de salida. El vertido se dilata por un tiempo t_v , momento en el que concluye la rebosadura en el microembalse, como puede verse en la figura.



El área comprendida entre el hidrograma de salida y el eje de abscisas representa el volumen de agua que pierde la unidad sistematizada (E_{s2}).

$$E_{s2} = \int_{t_\ell}^{D+tv} F(h) \cdot dt = \int_{t_\ell}^{D+tv} Q_s(t) \cdot dt$$

Si analizamos la figura apreciaremos tres superficies en las que conviene detenernos. La primera se corresponde con el área comprendida entre los dos hidrogramas de crecida (V1) y representa el volumen de agua retenido en el microembalse por encima de la cota de coronación del rebosadero debido a su efecto laminador. Este volumen es desaguado posteriormente, una vez acabado el aguacero, durante el tiempo de vaciado (t_v). La ecuación de conservación de masa exige que este volumen acumulado termine saliendo de la microcuenca. Al ser dos las vías simultáneas de salida que sigue el agua, hay que sumar al volumen desaguado por el rebosadero al final del chubasco (V2) el volumen que se infiltra en el área de recepción durante el tiempo de rebosamiento (V3) para poder establecer la siguiente igualdad:

$$V1 = V2 + V3$$

$$\text{en donde: } V1 = \int_{t_\ell}^{ta} [Q_e(t) - Q_s(t)] \cdot dt$$

$$V2 = \int_D^{D+tv} Q_s(t) \cdot dt$$

$$V3 = S_2 \cdot \int_D^{D+tv} v_i(t) \cdot dt$$

El volumen de agua que escapa del área de recepción y - en consecuencia - de la unidad sistematizada puede calcularse ahora mediante la expresión:

$$E_{s2} = \int_0^{D+tv} F(h) \cdot dt = \int_{t_\ell}^{D+tv} F(h) \cdot dt$$

$$E_{s2} = \int_{t_\ell}^{D+tv} Q_s(t) \cdot dt = \int_{t_\ell}^D Q_e(t) \cdot dt - V1 + V2 = \int_{t_\ell}^D Q_e(t) \cdot dt - V3$$

Luego:

$$E_{s2} = \int_{t_l}^D [e(t) \cdot S_1 + [i(t) - v_i(t)] \cdot S_2] \cdot dt - S_2 \cdot \int_D^{D+t_v} v_i(t) \cdot dt$$

$$\Rightarrow \boxed{E_{s2} = \int_{t_l}^D [e(t) \cdot S_1 + i(t) \cdot S_2] \cdot dt - S_2 \cdot \int_{t_l}^{D+t_v} v_i(t) \cdot dt} \quad [30]$$

Si hacemos las sustituciones habituales;

$$i(t) = k$$

$$e(t) = \vartheta \cdot \left[k - f_c - (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot (t-\Delta t)} \right]$$

$$v_i(t) = g_c + (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot (t-\sigma t)}$$

nos queda la siguiente expresión:

$$E_{s2} = \int_{t_l}^D \left[[k - f_c - (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot (t-\Delta t)}] \cdot \vartheta \cdot S_1 + k \cdot S_2 \right] \cdot dt - S_2 \cdot \int_{t_l}^{D+t_v} \left[g_c + (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot (t-\sigma t)} \right] \cdot dt$$

Al integrar resulta:

$$\boxed{E_{s2} = \left[k \cdot (D-t_l) + g_c \cdot (t_l - D - t_v) + \frac{g_0 - g_c}{\beta} \cdot e^{\beta \cdot \sigma t} \cdot \left[e^{-\beta \cdot (D+t_v)} - e^{-\beta \cdot t_l} \right] \right] \cdot S_2 + \mathbb{P}} \quad [31]$$

siendo \mathbb{P} una expresión que depende del factor ϑ . En concreto:

* Si $t_l \leq t_l < D$

$$\mathbb{P} = \left[k \cdot (D-t_l) + f_c \cdot (t_l - D) + \frac{f_0 - f_c}{\alpha} \cdot e^{\alpha \cdot \Delta t} \cdot \left[e^{-\alpha \cdot D} - e^{-\alpha \cdot t_l} \right] \right] \cdot S_1$$

* Si $t_l < t_l < D$

$$\mathbb{P} = \left[k \cdot (D-t_l) + f_c \cdot (t_l - D) + \frac{f_0 - f_c}{\alpha} \cdot e^{\alpha \cdot \Delta t} \cdot \left[e^{-\alpha \cdot D} - e^{-\alpha \cdot t_l} \right] \right] \cdot S_1$$

* Si $t_l < D \leq t_l$, entonces $\mathbb{P} = 0$

Aunque aún no tenemos el tiempo de rebosadura hallado, estamos en disposición de concretar la ecuación que calcula la disponibilidad hídrica (= infiltración) que origina un aguacero de intensidad constante y duración genérica en el área de recepción. La importancia de este resultado nos anima a escribir tal ecuación sin más demora:

$$\boxed{\text{DESP} = P + E_{s1} - E_{s2}} \quad [\text{ec. 3}]$$

siendo: $P = k \cdot D$

$$E_{s1} = 0 \quad \text{si } D \leq t_i \quad [\implies \text{precipitación débil}]$$

$$E_{s1} > 0 \quad \text{si } D > t_i. \quad \text{En concreto:}$$

$$E_{s1} = \left[(k - f_c) \cdot (D - t_i) + \frac{1}{\alpha} \cdot (f_0 - f_c) \cdot e^{\alpha \cdot \Delta t} \cdot e^{-\alpha \cdot D} \right] - \left[-\frac{1}{\alpha} \cdot (f_0 - f_c) \cdot e^{\alpha \cdot \Delta t} \cdot e^{-\alpha \cdot t_i} \right] \cdot \frac{S_1}{S_2} \quad [\text{ec. 19}]$$

$$E_{s2} = 0 \quad \text{si } D \leq t_\ell$$

$$E_{s2} > 0 \quad \text{si } D > t_\ell \quad [\text{es decir: si la precipitación es excesiva o dañosa}]. \quad \text{En concreto:}$$

$$E_{s2} = \left[k \cdot (D - t_\ell) + g_c \cdot (t_\ell - D - t_v) + \frac{g_0 - g_c}{\beta} \cdot e^{\beta \cdot \alpha t} \cdot \left[e^{-\beta \cdot (D + t_v)} - e^{-\beta \cdot t_\ell} \right] \right] + \frac{P}{S_2} \quad [\text{ec. 31}]$$

siendo P una expresión que depende del factor e , como acabamos de indicar.

El calado final en régimen estacionario ($Y_{máx}$) para un aguacero de intensidad constante y de larga duración, en el que las velocidades de infiltración se hayan estabilizado, permite acotar la carga de vertido superiormente: $h \leq Y_{máx} - H$

Para resolver este problema hay que acudir a la ecuación diferencial del microembalse [ec. 10] y particularizar a la

situación descrita. Al ser el régimen permanente, las entradas de agua coinciden con las salidas, es decir: el embalse mantiene un volumen de agua constante ($V = \text{constante} \Rightarrow dV = 0$).

La solución al problema planteado es inmediata:

$$\left[i(t) \cdot S_2 + [i(t) - v_i(t)] \cdot S_1 - v_i(t) \cdot S_2 \right] \cdot dt - c \cdot L \cdot (y-H)^{1,5} \cdot dt = dV = 0$$

Si trabajamos con un aguacero de intensidad constante ($i(t) = k$) y si sustituimos $v_i(t)$ por f_c y $v_o(t)$ por g_c , nos queda la expresión:

$$\left[k \cdot S_2 + [k - f_c] \cdot S_1 - g_c \cdot S_2 \right] \cdot dt - c \cdot L \cdot (y - H)^{1,5} \cdot dt = 0$$

Sencillas operaciones conducen finalmente a la ecuación:

$$y = y_{\text{máx}} = H + \left[\frac{(k - f_c) \cdot S_1 + (k - g_c) \cdot S_2}{c \cdot L} \right]^{2/3} \quad [32]$$

Esta fórmula puede servir de ayuda para el dimensionamiento del vertedero de demasías de la unidad sistematizada.

En buena lógica, la laminación que produce un microembalse es bastante reducida. Así, al poco tiempo de iniciado el vertido, el caudal de salida se iguala al caudal de entrada. [En la figura se produce a partir de t_a .]

La obtención del calado en esta situación es inmediata: basta con igualar caudales y despejar y .

$$Q_a(t) = Q_s(t)$$

$$e(t) \cdot S_1 + (i(t) - v_i(t)) \cdot S_2 = F(h)$$

$$\left[k - f_c - (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot (t - \Delta t)} \right] \cdot S_1 + \left[k - g_c - (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot (t - \Delta t)} \right] \cdot S_2 =$$

$$\rightarrow = F(h) = c \cdot L \cdot (y - H)^{1,5}$$

Al despejar nos queda:

$$y = H + \left[\frac{\left[k - f_c - (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot (t - \Delta t)} \right] \cdot e \cdot S_1 + \left[k - g_c - (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot (t - \square t)} \right] \cdot S_2}{c \cdot L} \right]^{2/3} \quad [33]$$

Esta lámina de agua se produce en el microembalse al poco tiempo de iniciarse el vertido de demasías. La fórmula es válida para $t_a \leq t \leq D$, siendo t_a un instante posterior pero próximo al tiempo límite ($t_a \approx t_l$).

D

Fase final de vaciado con rebosadura

Una vez acabado el aguacero comienza la fase de vaciado del microembalse. Al principio el desagüe se puede producir de forma rápida a través del rebosadero. Después, la ley de vaciado se rige exclusivamente por la velocidad de infiltración en el área de recepción. Ambos procesos constituyen situaciones particulares de la ecuación general del microembalse.

Para hallar el tiempo de rebosadura una vez finalizado el chubasco (t_v), la ecuación diferencial que resuelve el problema es la siguiente:

$$S_2 \cdot db = - \left[v_i(t) \cdot S_2 + c \cdot L \cdot h^{1,5} \right] \cdot dt \quad [\text{ec. 10b}]$$

La velocidad de infiltración $v_i(t)$ coincide en este caso con la capacidad de infiltración del área de recepción [ec. 25].

$$v_i(t) = f(t) = g_c + (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot (t - \alpha t)}$$

La capacidad de infiltración al acabar el aguacero se obtiene particularizando para $t = D$. A su vez, la capacidad de infiltración cuando concluye el vertido fuera de la unidad vale $f(D+t_v)$. Se cumplen las siguientes inecuaciones:

$$g_0 > f(D) \geq f(D+t_v) \geq g_c$$

El siguiente proceso iterativo converge hacia el resultado buscado: Suponemos que $f(t)$ es constante y que vale $f(D)$. La ecuación diferencial a resolver resulta de variables separadas:

$$S_2 \cdot dh = - \left[f(D) \cdot S_2 + c \cdot L \cdot h^{1,5} \right] \cdot dt$$

Al integrar esta expresión desde la carga de vertido inicial ($y_f - H$) hasta cero, obtenemos el primer valor de tanteo para el tiempo de rebosadura (t_1).

$$\int_0^{t_1} dt = t_1 = - \int_{Y_f - H}^0 \frac{S_2}{\left[f(D) \cdot S_2 + c \cdot L \cdot h^{1,5} \right]} \cdot dh$$

Obtenemos $f(D+t_1)$. Con este valor volvemos a repetir la operación, es decir resolvemos la ecuación:

$$t_2 = - \int_{Y_f - H}^0 \frac{S_2}{\left[f(D+t_1) \cdot S_2 + c \cdot L \cdot h^{1,5} \right]} \cdot dh$$

y así sucesivamente hasta conseguir la precisión apetecida. Finalmente:

$$t_v = t_0 \quad [34]$$

Para facilitar el proceso de cálculo conviene hallar la primitiva de la función:

$$r(h) = \frac{S_2}{f \cdot S_2 + c \cdot L \cdot h^{1,5}}$$

$$dF(h) = r(h) \cdot dh \implies R(h) = \dots \quad (\text{véase el anexo III})$$

Se obtiene la siguiente expresión para la primitiva:

$$R(h) = - \frac{2 \cdot S_2}{3 \cdot k \cdot b} \cdot \ln \left[\sqrt{h} + k \right] + \frac{S_2}{3 \cdot k \cdot b} \cdot \ln \left[h - k \cdot \sqrt{h} + k^2 \right] + \\ + \frac{2 \cdot S_2}{\sqrt{3} \cdot b \cdot k} \cdot \operatorname{arctg} \left[\frac{2 \cdot (\sqrt{h} - 0,5 \cdot k)}{\sqrt{3} \cdot k} \right]$$

siendo: $b = c \cdot L$

$$f = f(D+t_1)$$

$$k = \left[\frac{f \cdot S_2}{c \cdot L} \right]^{1/3}$$

Gracias a esta función podemos escribir:

$$t_{i+1} = R(y_f - H) - R(0)$$

con lo que podemos hallar el tiempo final de rebosadura (t_v) fácilmente.

El tiempo total de vertido (Ttv) que provoca un aguacero de intensidad constante en una microcuenca se extiende desde el tiempo límite (t_z) hasta que concluye la rebosadura, en el instante $D + t_v$.

$$Ttv = D + t_v - t_z \quad [35]$$

Durante todo este tiempo se produce escorrentía fuera de la unidad sistematizada, lo que disminuye sus recursos hídricos.

E

Fase final de vaciado sin vertido

Una vez que ha finalizado el vertido, entramos en la última fase de funcionamiento de la microcuenca en la que se completa el vaciado por infiltración. Este tiempo de infiltración final (tif) se obtiene a partir de la ecuación 10c :

$$S(y) \cdot dy = -v_i(t) \cdot S_2 \cdot dt$$

Si hacemos las sustituciones habituales,

$S(y) = S_2$ y $v_i(t) = g_c + (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot (t - \alpha t)}$, nos queda:

$$S_2 \cdot dy = - \left[g_c + (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot (t - \alpha t)} \right] \cdot S_2 \cdot dt$$

El intervalo de integración abarca desde el calado final tras la rebosadura ($y_r \leq H$) hasta cero. Como límites temporales de integración tenemos: $D + tv$ y $D + tv + tif$, respectivamente.

$$\int_{y_r}^0 dy = - \int_{[D+tv]}^{[D+tv+tif]} \left[g_c + (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot (t - \alpha t)} \right] \cdot dt$$

Operando queda:

$$y_r = g_c \cdot tif - \frac{1}{\beta} \cdot (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot (D+tv - \alpha t)} \cdot \left[e^{-\beta \cdot tif} - 1 \right] \quad [36]$$

En esta expresión todos los valores son conocidos a excepción del tiempo final de vaciado tif, que se obtiene por métodos de aproximación sucesiva ya que no se puede despaajar de la ecuación anterior.

En resumen, podemos concluir que ante un aguacero de intensidad constante y duración superior al tiempo límite se suceden las cuatro fases de funcionamiento del microembalse. Tomando como origen de tiempos el comienzo del aguacero hemos destacado los siguientes instantes:

- * tiempo de encharcamiento del área de impluvio: t_i
- * tiempo de encharcamiento del área de recepción t_r

- * tiempo límite: t_l
- * duración del aguacero: $D (> t_l)$
- * tiempo final de rebosadura: $D + t_v$
- * tiempo de conclusión: $t_f = D + t_v + t_{if}$ [37]
- [o duración de la infiltración en el área receptora]

Si el tiempo de conclusión se prolonga mucho (días) podrá haber problemas de anoxia en las raíces del repoblado, situación que resulta muy negativa para la supervivencia y el crecimiento radical de las plantas.

Por otro lado, si el tiempo transcurrido hasta el siguiente aguacero (d) es menor que el tiempo de conclusión ($d < t_f$), el volumen de agua inicial al comienzo del nuevo chubasco no será nulo ($V_i > 0$).

La siguiente ecuación sirve para obtener dicho volumen inicial:

$$\int_{Y_r}^{Y_i} dy = - \int_{[D+tv]}^d \left[g_c + (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot (t-\square t)} \right] \cdot dt$$

En esta ocasión la incógnita es el calado del agua al comienzo del nuevo aguacero, y_i , a partir del cual podremos deducir V_i .

$$Y_i = Y_r - g_c \cdot (d-D-tv) + \frac{1}{\beta} \cdot (g_0 - g_c) \cdot e^{\beta \cdot \square t} \cdot \left[e^{-\beta \cdot d} - e^{-\beta \cdot (D+tv)} \right]$$

La tasa de infiltración en el área receptora al inicio del nuevo chubasco seguirá la misma ley del aguacero anterior, es decir: no habrá que fijar un nuevo origen de tiempos. Por el contrario, si el intermedio tiene la suficiente duración, el primer episodio de lluvia no afectará a las tasas de infiltración del segundo que volverán a adoptar las conocidas expresiones que nos servían de punto de partida al comienzo de este capítulo:

* para el área de impluvio; $f(t) = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot t}$

* para el área de recepción; $f(t) = g_c + (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot t}$

Cabe concebir infinidad de situaciones intermedias en las que la humedad del suelo originada por el primer aguacero incida en

las tasas de infiltración que se producen en el chubasco posterior. En función del tiempo transcurrido y de la evapotranspiración habida entre ambos episodios de lluvia, la tasa de infiltración inicial para el segundo aguacero variará respecto de g_0 (o de f_0 , si nos referimos al área de impluvio). Si la capacidad de infiltración del suelo al comienzo del nuevo chubasco vale h_0 , podemos obtener el desplazamiento de tiempos (δt) que explica tal comportamiento a partir de la siguiente igualdad:

$$h_0 = g_c + (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot \delta t}$$

Una vez conocido δt , la capacidad de infiltración en el área colectora para el segundo aguacero valdrá:

$$f(t) = g_c + (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot (t + \delta t)}$$

El mismo razonamiento nos permite obtener la capacidad de infiltración en el área de impluvio. Basta con hallar el desplazamiento de tiempos apropiado (λt) que explique la capacidad de infiltración inicial del suelo, para poder concluir que:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot (t + \lambda t)}$$

Antes de finalizar este capítulo vamos a obtener otra expresión que calcula el volumen de agua infiltrado en el área de recepción. En un primer instante y hasta que se llega al tiempo de encharcamiento (t_p) la velocidad de infiltración coincide con la intensidad de lluvia (que puede verse alterada por las aportaciones del área de impluvio). Superado este instante, la tasa de infiltración viene condicionada por el propio suelo. Según el modelo empírico de Horton, se cumple:

$$v_i(t) = g_c + (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot (t - t_p)} \quad [\text{ec. 25}]$$

El proceso de infiltración se prolonga hasta el tiempo final (t_f) que hemos determinado anteriormente.

De acuerdo con estas consideraciones podemos escribir:

-1- si $t_i \geq t_r$

$$DESP = \int_0^{t_r} i(t) \cdot dt + \int_{t_r}^{t_f} \left[g_c + (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot (t - \Delta t)} \right] \cdot dt$$

-2- si $t_i < t_r$

$$DESP = \int_0^{t_i} i(t) \cdot dt + \int_{t_i}^{t_r} \left[i(t) + e(t) \cdot \frac{s_1}{s_2} \right] \cdot dt + \int_{t_r}^{t_f} \left[g_c + (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot (t - \Delta t)} \right] \cdot dt$$

Si hacemos las sustituciones habituales:

$$i(t) = k$$

$$e(t) = k - f_c - (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot (t - \Delta t)}$$

y si operamos nos queda:

-1- si $t_i \geq t_r$

$$DESP = k \cdot t_r + g_c \cdot (t_f - t_r) - \frac{1}{\beta} \cdot (g_0 - g_c) \cdot e^{\beta \cdot \Delta t} \cdot \left[e^{-\beta \cdot t_f} - e^{-\beta \cdot t_r} \right]$$

[38]

-2- si $t_i < t_r$

$$DESP = k \cdot t_r + \frac{s_1}{s_2} \cdot (k - f_c) \cdot (t_r - t_i) + \frac{s_1}{\alpha \cdot s_2} \cdot (f_0 - f_c) \cdot e^{\alpha \cdot \Delta t} \cdot \left[e^{-\alpha \cdot t_r} - e^{-\alpha \cdot t_i} \right] +$$

$$+ g_c \cdot (t_f - t_r) - \frac{1}{\beta} \cdot (g_0 - g_c) \cdot e^{\beta \cdot \Delta t} \cdot \left[e^{-\beta \cdot t_f} - e^{-\beta \cdot t_r} \right]$$

[39]

6.3 Programa HYDNUM. Manual de usuario

6.3.1. Finalidad

Hydnum es un programa que simula el comportamiento hidrológico de una unidad sistematizada ante un aguacero de intensidad constante, aplicando las hipótesis y ecuaciones establecidas en el tema anterior.

6.3.2. Características generales

Nombre del programa: HYDNUM.EXE

Lenguaje: BASIC

Fecha de realización: diciembre de 1994

Autor: Andrés Martínez de Azagra Paredes

Tamaño: 52.294 bytes

6.3.3. Utilización

Se trata de un programa conversacional de muy fácil manejo. La comunicación con el programa se realiza a través del teclado. Los resultados se ofrecen por el monitor.

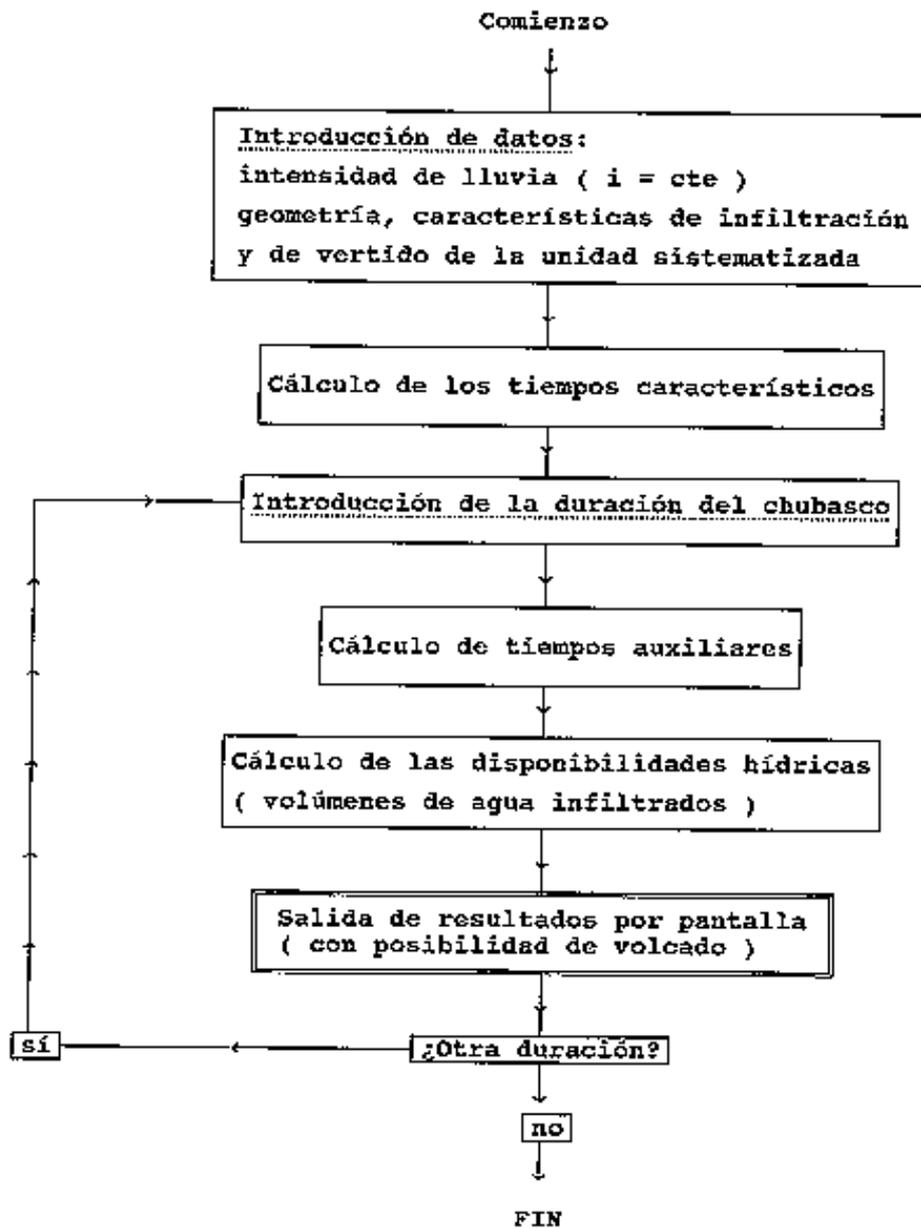
Si se desea imprimir algún dato o resultado basta con pulsar a la

tecla

Impr Pant

, Antes habrá que activar la impresora.

6.3.4. Organigrama general



6.3.5. Datos de entrada

El programa solicita:

- * la intensidad de lluvia a analizar, K (en mm/h)

- * la geometría de la unidad sistematizada
 - * el área de impluvio, $S1$ (en m^2)
 - * el área de recepción, $S2$ (en m^2)
 - * la altura de las represas, H (en mm)

- * las características de infiltración en el área de impluvio de acuerdo con el modelo de Horton
 - * la capacidad de infiltración inicial, $F0$ (en mm/h)
 - * la capacidad de infiltración final, FC (en mm/h)
 - * el exponente de disminución, $ALFA$ (en min^{-1})

- * las características de infiltración en el área de recepción
 - * la capacidad de infiltración inicial, $G0$ (en mm/h)
 - * la capacidad de infiltración final, GC (en mm/h)
 - * el exponente de disminución, $BETA$ (en min^{-1})

- * los datos del vertedero de demasías
 - * la anchura, L (en m)
 - * el coeficiente de gasto, C (adimensional)

6.3.6. Funcionamiento de la unidad sistematizada

Ante un aguacero se producen unas respuestas hidrológicas en la unidad sistematizada, que el programa HYDNUM simula y cuantifica.

Si consideramos un chubasco de intensidad constante suficientemente largo e intenso, el proceso de respuesta de la unidad cabe dividirlo en cinco etapas:

A) Una etapa previa al encharcamiento del área de recepción

En esta etapa se llegará al encharcamiento del área de impluvio si su capacidad de infiltración es inferior a la del área receptora. En este caso y una vez superado dicho instante, comenzarán las aportaciones de agua (cosecha de agua).

Otra posibilidad (no deseable para la economía del agua en el área de recepción) es que se inicie el llenado del microembalse antes de que comience la escorrentía superficial en el área de impluvio.

B) Fase inicial de llenado sin rebosadura

El microembalse se encharca y la lámina de agua va aumentando conforme transcurre el aguacero pero sin que se llegue a producir un vertido fuera de la unidad.

La situación límite se concreta al igualar el calado del agua con la altura de las represas (o con el desnivel existente en la poceta). En este instante (tiempo límite) el sistema deja de funcionar como una cuenca endorreica. Se produce escorrentía fuera de la unidad sistematizada.

C) Fase general con rebosadura

El chubasco continúa, con lo que prosigue la rebosadura de agua hasta que éste concluya.

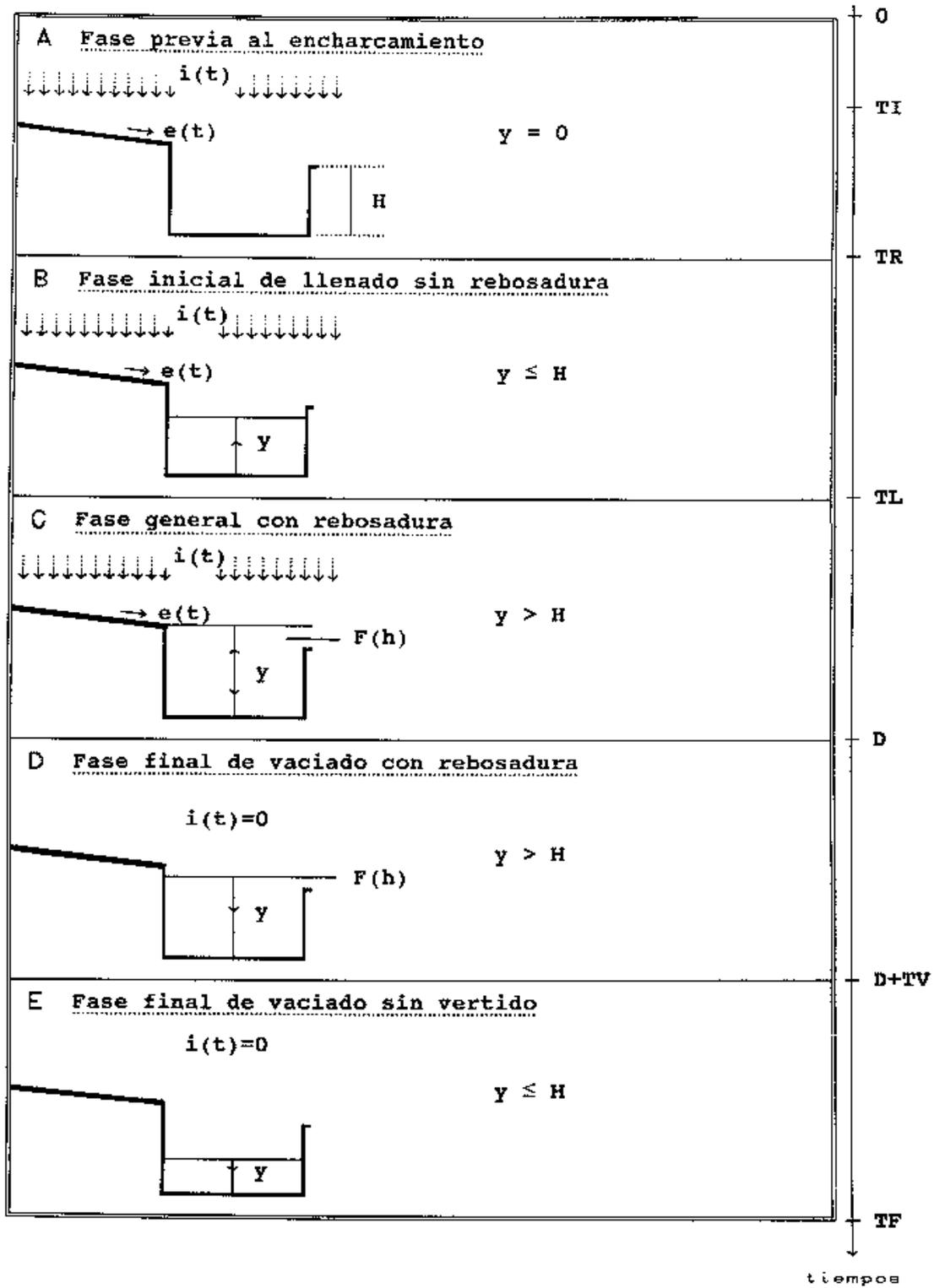
D) Fase final de vaciado con rebosadura

En un primer momento, nada más acabado el aguacero, el vaciado del área de recepción se produce por dos vías: la escorrentía superficial y la infiltración.

Esta etapa finaliza una vez transcurrido el tiempo final de rebosadura.

E) Fase final de vaciado sin vertido

Es la última etapa, caracterizada por un proceso de infiltración pura que termina cuando el suelo absorbe todo el agua que quedó retenida en el microembalse



6.3.7. Cálculos

El programa HYDNUM obtiene los tiempos de encharcamiento del área de impluvio (TI; ec. 14) y del área de recepción (TR; ecs. 21 o 23) así como el tiempo límite (TL; ec. 28), que es la duración máxima que puede tener el aguacero de intensidad constante fijada para que no se produzcan vertidos fuera de la unidad.

Una vez hallados los tres tiempos característicos de la sistematización primaria, el programa está en disposición de simular el comportamiento de la unidad para cualquier tiempo de lluvia que se desee.

Una vez introducida la duración del chubasco, HYDNUM obtiene como resultados principales:

- * el volumen de agua infiltrado en el área de impluvio, PIMP [ec. 18]
- * el volumen de agua infiltrado en el área de recepción, DESP [ecs. 3 + 19 + 31 o ec. 38 o 39]
- * el volumen medio de agua infiltrado en la unidad, PROM [ec. 5]

Como parámetros auxiliares de interés ofrece:

- * la precipitación caída, P
- * la lluvia neta generada en el área de impluvio, ES1 [ec. 19]
- * la escorrentía que escapa a la sistematización, ES2 [ec. 31]
- * la altura mínima de las represas para que no haya vertido, YU [ec. 29]
- * el tiempo final de rebosadura, TV [ec. 34]
- * el tiempo total de vertido, TTV [ec. 35]
- * el tiempo final de vaciado, TIF [ec. 36]
- * la duración de la infiltración en el área de recepción (o tiempo de conclusión, TF) [ec. 37]

Las ecuaciones que resuelven han sido desarrolladas en un apartado anterior, por lo que no consideramos oportuno el volverlas a concretar aquí [máxime por su aparatoso aspecto].

6.3.8. Salida de resultados

Aunque el programa trabaja con más cifras decimales, los resultados tienen el siguiente formato:

- * tiempos característicos; en minutos y con dos cifras decimales
- * los volúmenes de agua infiltrada; en milímetros y con una cifra decimal
- * la escorrentía generada; en litros y con una cifra decimal
- * la altura mínima de las represas para que no haya escorrentía fuera de la unidad; en milímetros con una cifra decimal.

En esta primera versión del programa HYDNUM nos hemos esforzado sobre todo en la coherencia y precisión de las sentencias y cálculos que realiza. Los resultados se ofrecen únicamente a través del monitor. Si se desea imprimirlos basta con realizar un volcado de pantalla en el momento más apropiado. En este sentido y durante su ejecución, el programa completa tres pantallas con los datos y resultados de mayor interés, de manera que la información de cualquier simulación puede quedar plasmada en una hoja y media.

6.3.9. Ejemplos numéricos

En una ladera de la Sierra de Gador con un suelo arcilloso y vegetación muy rala el ingeniero desea realizar una repoblación mixta de encina y pino carrasco en microcuencas con una densidad de 1000 pies por hectárea.

Con los ensayos de infiltración realizados en la ladera se ha ajustado la ley de Horton por mínimos cuadrados. El resultado es el siguiente:

- la tasa de infiltración inicial vale 120 mm/h
- la tasa de infiltración final vale 6 mm/h
- el exponente de disminución vale $0,04 \text{ min}^{-1}$

La unidad sistematizada va a estar formada por 9 m² de área de impluvio (en donde no se actúa sobre la vegetación ni sobre el suelo) y 1 m² de área de recepción. En la banqueta se elimina toda la vegetación, se mulla el suelo y se crean unas represas de una altura suficiente para retener todo el agua que se genere en un aguacero de una hora de duración y 76,5 mm/h de intensidad [chubasco de diseño fijado por el proyectista por consideraciones hidrometeorológicas]

Vamos a realizar la simulación bajo los tres supuestos diferentes que cabe imaginar:

- 1) La preparación del suelo en la banqueta aumenta la tasa de infiltración en el área de recepción con relación al terreno inalterado de la ladera
- 2) La tasa de infiltración se mantiene respecto a la ladera original
- 3) La preparación del terreno empeora sus características de infiltración

preparación del suelo	favorable	neutra	desfavorable
capacidad de infiltración inicial	130	120	110
capacidad de infiltración final	10	6	5
exponente de disminución	0,03	0,04	0,05

Nota:

Siempre convendrá realizar un doble ensayo de infiltrometría: uno sobre el suelo inalterado y el segundo sobre el suelo preparado con las herramientas y maquinaria que se tenga previsto utilizar en la repoblación.

El vertido de las demasías se produce por los laterales de la banqueta a través de dos rebosaderos de 0,2 m de ancho y que funcionan en régimen crítico (es decir: con un coeficiente de gasto, $c \approx 0,385$).

A continuación incluimos los resultados que ofrece el programa HYDNUM para este ejemplo, obtenidos mediante volcado de pantalla:

```
PROGRAMA HYDNUM
Intensidad de lluvia a analizar (en mm/h)? 76.5

GEOMETRIA DE LA UNIDAD SISTEMATIZADA
Area de impluvio (en m2)? 9
Area de recepción (en m2)? 1
Altura de las represas (en mm)? 0

CARACTERISTICAS DE INFILTRACION EN EL AREA DE IMPLUVIO
Capacidad de infiltración inicial (en mm/h)? 120
Capacidad de infiltración final (en mm/h)? 6
Exponente de disminución (en min-1)? 0.04
-///El tiempo de encharcamiento vale 15.16 min

CARACTERISTICAS DE INFILTRACION EN EL AREA DE RECEPCION
Capacidad de infiltración inicial (en mm/h)? 130
Capacidad de infiltración final (en mm/h)? 10
Exponente de disminución (en min-1)? 0.03
-///El tiempo de encharcamiento vale 19.07 min
-///El tiempo límite vale 19.07 min

CARACTERISTICAS DEL REBOSADERO
Anchura (en m) ? 0.4 Coeficiente de gasto (adim.) ? 0.385
```

PROGRAMA HYDNUM

Para la intensidad de lluvia analizada: $k = 76.5$ mm/h, los

TIEMPOS CARACTERISTICOS valen:

Tiempo de encharcamiento del área de impluvio:	15.16 min
Tiempo de encharcamiento del área de recepción:	19.07 min
Tiempo límite para la unidad sistematizada:	19.07 min

Duración del aguacero (en min)? 60

-///El tiempo final de rebosadura vale	1.76 min
-///El tiempo total de vertido vale	42.69 min
-///El tiempo final de vaciado vale	0.00 min
-///El tiempo de conclusión vale	61.76 min

-///Aportación del área de impluvio:	253.8	1
-///Escorrentía que escapa de la unidad:	265.6	1

VOLUMEN INFILTRADO (= disponibilidad hídrica)

-///en el área de impluvio:	48.3	mm
-///en el área de recepción:	64.7	mm

Intensidad: 76.5 mm/h
 Duración: 60.00 min
 Precipitación: 76.5 mm

PROGRAMA HYDNUM

Volumen de agua infiltrado o
 disponibilidad hídrica (en mm)

en terreno llano	76.5
en el área de impluvio	48.3
en el area de recepción	64.7
en la unidad sistematizada ...	49.9

Altura de represas proyectada: 0.0 mm
 Altura mínima para endorreísmo: 266.5 mm

PROGRAMA HYDNUM
Intensidad de lluvia a analizar (en mm/h)? 76.5

GEOMETRIA DE LA UNIDAD SISTEMATIZADA

Area de impluvio (en m²)? 9
Area de recepción (en m²)? 1
Altura de las represas (en mm)? 0

CARACTERISTICAS DE INFILTRACION EN EL AREA DE IMPLUVIO

Capacidad de infiltración inicial (en mm/h)? 120
Capacidad de infiltración final (en mm/h)? 6
Exponente de disminución (en min⁻¹)? 0.04
-///El tiempo de encharcamiento vale 15.16 min

CARACTERISTICAS DE INFILTRACION EN EL AREA DE RECEPCION

Capacidad de infiltración inicial (en mm/h)? 120
Capacidad de infiltración final (en mm/h)? 6
Exponente de disminución (en min⁻¹)? 0.04
-///El tiempo de encharcamiento vale 15.16 min
-///El tiempo limite vale 15.16 min

CARACTERISTICAS DEL REBOSADERO

Anchura (en m) ? 0.4 Coeficiente de gasto (adim.) ? 0.385

PROGRAMA HYDNUM

Para la intensidad de lluvia analizada: k = 76.5 mm/h, los

TIEMPOS CARACTERISTICOS valen:

Tiempo de encharcamiento del área de impluvio: 15.16 min
Tiempo de encharcamiento del área de recepción: 15.16 min
Tiempo límite para la unidad sistematizada: 15.16 min

Duración del aguacero (en min)? 60

-///El tiempo final de rebosadura vale 2.34 min
-///El tiempo total de vertido vale 47.18 min
-///El tiempo final de vaciado vale 0.00 min
-///El tiempo de conclusión vale 62.34 min

-///Aportación del área de impluvio: 253.8 l
-///Escorrentía que escapa de la unidad: 281.3 l

VOLUMEN INFILTRADO (= disponibilidad hídrica)

-///en el área de impluvio: 48.3 mm
-///en el área de recepción: 49.0 mm

Intensidad: 76.5 mm/h
 Duración: 60.00 min
 Precipitación: 76.5 mm

PROGRAMA HYDNUM

Volumen de agua infiltrado o
 disponibilidad hídrica (en mm

en terreno llano	76.5
en el área de impluvio	48.3
en el área de recepción	49.0
en la unidad sistematizada ...	48.4

Altura de represas proyectada: 0.0 mm
 Altura mínima para endorreísmo: 282.0 mm

PROGRAMA HYDNUM
Intensidad de lluvia a analizar (en mm/h)? 76.5

GEOMETRIA DE LA UNIDAD SISTEMATIZADA

Area de impluvio (en m²)? 9
Area de recepción (en m²)? 1
Altura de las represas (en mm)? 0

CARACTERISTICAS DE INFILTRACION EN EL AREA DE IMPLUVIO

Capacidad de infiltración inicial (en mm/h)? 120
Capacidad de infiltración final (en mm/h)? 6
Exponente de disminución (en min⁻¹)? 0.04
-///El tiempo de encharcamiento vale 15.16 min

CARACTERISTICAS DE INFILTRACION EN EL AREA DE RECEPCION

Capacidad de infiltración inicial (en mm/h)? 110
Capacidad de infiltración final (en mm/h)? 5
Exponente de disminución (en min⁻¹)? 0.05
-///El tiempo de encharcamiento vale 9.26 min
-///El tiempo limite vale 9.26 min

CARACTERISTICAS DEL REBOSADERO

Anchura (en m) ? 0.4 Coeficiente de gasto (adim.) ? 0.385

PROGRAMA HYDNUM

Para la intensidad de lluvia analizada: k = 76.5 mm/h, los

TIEMPOS CARACTERISTICOS valen:

Tiempo de encharcamiento del área de impluvio: 15.16 min
Tiempo de encharcamiento del área de recepción: 9.26 min
Tiempo límite para la unidad sistematizada: 9.26 min

Duración del aguacero (en min)? 60

-///El tiempo final de rebosadura vale 2.93 min
-///El tiempo total de vertido vale 53.67 min
-///El tiempo final de vaciado vale 0.00 min
-///El tiempo de conclusión vale 62.93 min

-///Aportación del área de impluvio: 253.8 l
-///Escorrentia que escapa de la unidad: 291.8 l

VOLUMEN INFILTRADO (= disponibilidad hídrica)

-///en el área de impluvio: 48.3 mm
-///en el área de recepción: 38.5 mm

Intensidad: 76.5 mm/h
 Duración: 60.00 min
 Precipitación: 76.5 mm

PROGRAMA HYDNUM

Volumen de agua infiltrado o
 disponibilidad hídrica (en mm

en terreno llano	76.5
en el área de impluvio	48.3
en el área de recepción	38.5
en la unidad sistematizada ...	47.3

Altura de represas proyectada: 0.0 mm
 Altura mínima para endorreísmo: 292.3 mm

PROGRAMA HYDNUM
Intensidad de lluvia a analizar (en mm/h)? 76.5

GEOMETRIA DE LA UNIDAD SISTEMATIZADA

Area de impluvio (en m²)? 9
Area de recepción (en m²)? 1
Altura de las represas (en mm)? 300

CARACTERISTICAS DE INFILTRACION EN EL AREA DE IMPLUVIO

Capacidad de infiltración inicial (en mm/h)? 120
Capacidad de infiltración final (en mm/h)? 6
Exponente de disminución (en min⁻¹)? 0.04
-///El tiempo de encharcamiento vale 15.16 min

CARACTERISTICAS DE INFILTRACION EN EL AREA DE RECEPCION

Capacidad de infiltración inicial (en mm/h)? 130
Capacidad de infiltración final (en mm/h)? 10
Exponente de disminución (en min⁻¹)? 0.03
-///El tiempo de encharcamiento vale 19.07 min
-///El tiempo límite vale 63.46 min

CARACTERISTICAS DEL REBOSADERO

Anchura (en m) ? 0.4 Coeficiente de gasto (adim.) ? 0.385

PROGRAMA HYDNUM
Intensidad de lluvia a analizar (en mm/h)? 76.5

GEOMETRIA DE LA UNIDAD SISTEMATIZADA

Area de impluvio (en m²)? 9
Area de recepción (en m²)? 1
Altura de las represas (en mm)? 300

CARACTERISTICAS DE INFILTRACION EN EL AREA DE IMPLUVIO

Capacidad de infiltración inicial (en mm/h)? 120
Capacidad de infiltración final (en mm/h)? 6
Exponente de disminución (en min⁻¹)? 0.04
-///El tiempo de encharcamiento vale 15.16 min

CARACTERISTICAS DE INFILTRACION EN EL AREA DE RECEPCION

Capacidad de infiltración inicial (en mm/h)? 130
Capacidad de infiltración final (en mm/h)? 6
Exponente de disminución (en min⁻¹)? 0.04
-///El tiempo de encharcamiento vale 15.16 min
-///El tiempo límite vale 61.82 min

CARACTERISTICAS DEL REBOSADERO

Anchura (en m) ? 0.4 Coeficiente de gasto (adim.) ? 0.385

PROGRAMA HYDNUM
Intensidad de lluvia a analizar (en mm/h)? 76.6

GEOMETRIA DE LA UNIDAD SISTEMATIZADA

Area de impluvio (en m²)? 9
Area de recepción (en m²)? 1
Altura de las represas (en mm)? 300

CARACTERÍSTICAS DE INFILTRACION EN EL AREA DE IMPLUVIO

Capacidad de infiltración inicial (en mm/h)? 120
Capacidad de infiltración final (en mm/h)? 6
Exponente de disminución (en min⁻¹)? 0.04
-///El tiempo de encharcamiento vale 15.16 min

CARACTERÍSTICAS DE INFILTRACION EN EL AREA DE RECEPCION

Capacidad de infiltración inicial (en mm/h)? 110
Capacidad de infiltración final (en mm/h)? 5
Exponente de disminución (en min⁻¹)? 0.05
-///El tiempo de encharcamiento vale 9.26 min
-///El tiempo límite vale 60.77 min

CARACTERÍSTICAS DEL REBOSADERO

Anchura (en m) ? 0.4 Coeficiente de gasto (adim.) ? 0.385

La altura mínima de las represas para que las microcuencas funcionen de forma endorreica ante el aguacero de diseño vale:

preparación del suelo	favorable	neutra	desfavorable
altura mínima de las represas (en mm)	266,5	282,0	292,3

Por decisión del proyectista las microcuencas se han construido con unos muretes de 300 mm de altura, lo que supone para la intensidad de lluvia analizada los siguientes tiempos límite:

preparación del suelo	favorable	neutra	desfavorable
tiempo límite (TL) (en min)	63,46	61,82	60,77

Supongamos que se ha producido un chubasco de 75 min de duración con una intensidad de 97 mm/h en la ladera repoblada con las microcuencas que acabamos de describir. Con el programa HYDNUM podemos simular el comportamiento hidrológico de la ladera sistematizada y calcular los volúmenes de agua que se infiltran como consecuencia del aguacero (disponibilidades hídricas).

A continuación se ofrecen los resultados del programa para el caso de una preparación favorable del terreno.

PROGRAMA HYDNUM
Intensidad de lluvia a analizar (en mm/h)? 97

GEOMETRIA DE LA UNIDAD SISTEMATIZADA

Area de impluvio (en m²)? 9
Area de recepción (en m²)? 1
Altura de las represas (en mm)? 300

CARACTERISTICAS DE INFILTRACION EN EL AREA DE IMPLUVIO

Capacidad de infiltración inicial (en mm/h)? 120
Capacidad de infiltración final (en mm/h)? 6
Exponente de disminución (en min⁻¹)? 0.04
-///El tiempo de encharcamiento vale 6.28 min

CARACTERISTICAS DE INFILTRACION EN EL AREA DE RECEPCION

Capacidad de infiltración inicial (en mm/h)? 130
Capacidad de infiltración final (en mm/h)? 10
Exponente de disminución (en min⁻¹)? 0.03
-///El tiempo de encharcamiento vale 7.75 min
-///El tiempo límite vale 46.99 min

CARACTERISTICAS DEL REBOSADERO

Anchura (en m) ? 0.4 Coeficiente de gasto (adim.) ? 0.385

PROGRAMA HYDNUM

Para la intensidad de lluvia analizada: k = 97.0 mm/h, los

TIEMPOS CARACTERISTICOS valen:

Tiempo de encharcamiento del área de impluvio: 6.28 min
Tiempo de encharcamiento del área de recepción: 7.75 min
Tiempo límite para la unidad sistematizada: 46.99 min

Duración del aguacero (en min)? 75

-///El tiempo final de rebosadura vale 2.14 min
-///El tiempo total de vertido vale 30.15 min
-///El tiempo final de vaciado vale 1759.10 min
-///El tiempo de conclusión vale 1836.24 min

-///Aportación del área de impluvio: 618.7 l
-///Escorrentía que escapa de la unidad: 367.4 l

VOLUMEN INFILTRADO (= disponibilidad hídrica)

-///en el área de impluvio: 52.5 mm
-///en el área de recepción: 372.5 mm

Intensidad: 97.0 mm/h

Duración: 75.00 min

Precipitación: 121.3 mm

PROGRAMA HYDNUM

Volumen de agua infiltrado o
disponibilidad hídrica (en mm)

en terreno llano	121.3
en el área de impluvio	52.5
en el área de recepción	372.5
en la unidad sistematizada ...	84.5

Altura de represas proyectada: 300.0 mm

Altura mínima para endorreísmo: 668.2 mm

De acuerdo con los resultados que ofrece el programa de simulación HYDNUM, el aguacero supera la capacidad del microembalse. Se trata de una precipitación excesiva. Para que no fuese así la sistematización primaria debería haber sido proyectada con unas represas de al menos 668,2 mm de altura.

El volumen de agua infiltrado en el área de impluvio vale 52,5 mm, cantidad que coincide con el agua que la ladera original aprovecha del chubasco analizado. Esta cifra es 68,8 mm inferior a la disponibilidad hídrica que origina el aguacero en un terreno llano: 121,3 l/m².

Con las microcuencas proyectadas, la ladera se nutre de una forma mucho más eficiente que la ladera degradada original: el volumen de agua infiltrado vale 84,5 mm de promedio, existiendo puntos en los que la dotación de agua asciende a 372,5 l/m². Es en estos puntos en donde se va a realizar la plantación (áreas de recepción), lo que sin duda ayudará a su arraigo y primer crecimiento.

Una duda razonable a considerar es la de si no serán los periodos de encharcamiento demasiado largos para el repoblado. A partir del programa HYDNUM se puede despejar tal incógnita: La duración del proceso de infiltración en el área receptora es de 1836,24 min (es decir: 30,6 horas), lo que no parece que pueda ocasionar problemas serios de anoxia en las raíces del repoblado.

Un último comentario (no por ello menos importante):

La infiltrometría puede aportar datos de sumo interés dentro del ámbito forestal. Es por eso por lo que conviene divulgar y generalizar su uso.

El proceso de desertificación por aridez edáfica que padecen numerosísimas laderas de nuestra castigada geografía se explica al comparar la capacidad de infiltración de agua de la ladera con las

intensidades de lluvia que se producen en los climas torrenciales.

La realización de unos sencillos ensayos permite comprender el proceso desertificador a la vez que posibilita una intervención técnica y precisa para invertir la evolución regresiva del ecosistema. Con la ayuda del programa de simulación HYDNUM podemos diseñar la sistematización primaria más conveniente, según los criterios hidrológicos, microclimáticos y económicos que fijemos.

El instrumental necesario no puede ser más robusto, sencillo y barato: unos cilindros y un martillo, además de una regla y un cronómetro para realizar las mediciones. El único problema que se suele presentar en los ensayos de infiltración es el de disponer de agua en abundancia, lo que con ayuda de una carroceta se tiene perfectamente resuelto.

Para futuras revisiones del programa y del manual, agradecemos cualquier sugerencia por parte de los usuarios.

7.1 Introducción

Uno de los modelos más utilizados para estimar la escorrentía superficial es - sin lugar a dudas - el método del número de curva (también llamado de los complejos hidrológicos). Se trata de un modelo empírico que parte de unas hipótesis "semifísicas" ,no plenamente rigurosas pero sí suficientemente precisas a nivel práctico. Su único parámetro (el número de curva) ha sido ajustado a partir de infinidad de mediciones realizadas en cuencas aforadas. Para hallar este dato el Servicio de Conservación de Suelos Americano ha confeccionado unas tablas detalladas, de fácil uso y amplia validez que sirven de orientación al proyectista para determinar lluvias netas con las que predecir caudales de avenida o generar hidrogramas en cuencas inaforadas (véase el anexo IV).

El éxito del modelo estriba en su sencillez y buen ajuste y, aunque posee numerosas limitaciones y carencias, lo cierto es que se ha convertido en una herramienta habitual de la Hidrología de Superficie.

En este capítulo, vamos a utilizar el método del número de curva para cuantificar el volumen de agua que se infiltra en el terreno como consecuencia de un chubasco. Para tal fin supondremos que la diferencia entre la precipitación caída y la escorrentía superficial generada (dato que nos facilita el modelo de los números hidrológicos) coincide con el volumen de agua infiltrado, es decir;

$$I = P - Q \quad [6a]$$

en donde: P es la precipitación del aguacero, Q la escorrentía superficial e I la cantidad de agua que se infiltra en el suelo.

Se trata - desde luego - de una primera aproximación, hecha sin contar con la opinión de quienes proscriben taxativamente el método del número de curva para estimar la infiltración pero animado por bastantes autores que desoyen tal advertencia (Aron

et al, 1977; Hjelmfelt, 1979; Cadot, 1989; Hari, 1989; entre otros).

El método del número de curva presenta como sustancial ventaja la de cuantificar la escorrentía superficial a través de un solo parámetro, valor que se obtiene mediante un somero análisis del terreno, de su vegetación y de su aprovechamiento. Pero esta importante ventaja es, a su vez, el principal inconveniente que cabe achacar al método. A la hora de fijar el número de curva de un terreno se aprecia que la solución está sujeta a un cierto grado de variación, lo que provoca una sensación de imprecisión en quien aplica el método. Ello no debe extrañar puesto que el modelo sólo persigue una aproximación suficiente al problema.

En la aplicación que hacemos surge una duda adicional por el cambio de escala que efectuamos. Nosotros vamos a emplear el método para calcular la infiltración en distintos puntos de una ladera cuando el modelo ha sido calibrado para estimar la escorrentía directa en cuencas de varios kilómetros cuadrados. La distorsión que provocamos por este motivo es difícil de evaluar pero en modo alguno desdeñable. De hecho, la eficacia en la recolección de agua de escorrentía aumenta conforme disminuye la superficie de la cuenca recolectora (Boers et al, 1982).

En consecuencia, el modelo que ahora pasamos a desarrollar debe ser utilizado con mesura y sólo como primera orientación hasta que se elaboren otros sistemas más precisos o se ofrezcan tablas con números de curva ajustados a la escala de trabajo que precisamos (que es de metros cuadrados en vez de hectáreas).

7.2 Desarrollo matemático del modelo

De acuerdo con el método del número de curva, la escorrentía superficial que provoca un aguacero puede calcularse mediante la expresión:

$$Q = \frac{(P - P_0)^2}{P + 4 \cdot P_0} \quad [\text{con } P \geq P_0]$$

siendo: Q la escorrentía superficial (en mm)

P la precipitación del aguacero (en mm) y

P₀ el umbral de escorrentía (en mm), valor que se determina a partir del número de curva. Vale la siguiente relación:

$$P_0 = 0,2 \cdot \frac{25.400 - 254 \cdot N}{N}$$

Este número (N) depende del tipo de vegetación, del tipo de suelo, del tratamiento o explotación que tenga, de sus condiciones hidrológicas, y de su humedad al comienzo del chubasco en estudio. Se obtiene con la ayuda de unas tablas. (Para más detalles véase el anexo IV.)

Vamos a aplicar las ecuaciones anteriores a una unidad sistematizada, pero antes conviene que recordemos ciertas cuestiones:

De acuerdo con los fundamentos de la teoría que nos ocupa, las ecuaciones de continuidad a considerar distinguen en la ladera dos zonas diferentes: las áreas exportadoras de escorrentía y las áreas receptoras de agua. Con la sistematización primaria del terreno se crea un retículo artificial constituido por unidades elementales individualizables que están formadas por un área de impluvio y un área de recepción en su base.

La disponibilidad hídrica del área de recepción (DESP) se calcula con la ecuación:

$$\text{DESP} = P + E_{s1} - E_{s2} \quad [3]$$

siendo:

P = lo que llueve en el área de recepción

E_{s1} = lo que escurre del área de impluvio y

E_{s2} = lo que se va de la unidad sistematizada.

Por otra parte, la disponibilidad hídrica del área de impluvio se obtiene mediante la expresión:

$$\text{PIMP} = P - E_{s1} \quad [4]$$

Para definir el comportamiento hidrológico de la unidad sistematizada hay que conocer sus características topográficas e hidrológicas. La superficie del impluvio (S_1) y de la recepción (S_2) y la capacidad máxima del microembalse (CAPA) son los datos topográficos a tener en cuenta. La capacidad de infiltración del área productora y del área receptora así como la ecuación de descarga de las demasías completan la descripción.

En este caso, al utilizar el método de los complejos hidrológicos, el proceso de infiltración debe quedar descrito mediante números de curva. Distinguimos así entre el número de curva del área de impluvio (NI) y el número de curva del área de recepción (NR).

En lo que respecta a la función de almacenaje del área de recepción podemos admitir que el volumen de agua retenido en el microembalse es en todo momento menor o igual que su capacidad máxima, es decir:

$$0 \leq V \leq \text{CAPA}$$

siendo V la cantidad de agua almacenada en superficie dentro de la unidad sistematizada en un instante dado.

Esta suposición implica que a partir del momento en que $V = \text{CAPA}$, cualquier aportación nueva al microembalse escurre fuera de la unidad. Esta hipótesis de desagüe instantáneo de los excedentes es pesimista a la hora de cuantificar la disponibilidad hídrica por lo que podemos concluir que conduce a resultados que estarán del

lado de la seguridad.

Por otra parte, vamos a suponer que el volumen de agua almacenado en el microembalse al comienzo de cualquier aguacero es nulo, o sea: $V = 0$ litros.

Con estas premisas estamos ya en situación de particularizar las ecuaciones generales.

La disponibilidad hídrica del área de impluvio vale;

$$\text{PIMP} = P - E_{s1} = P - L \cdot \frac{(P - P1)^2}{P + 4 \cdot P1} \quad [40]$$

en donde: P es la precipitación del aguacero (en mm)

$P1$ es el umbral de escorrentía del área de impluvio (en mm) que se calcula a partir del número de curva correspondiente (NI)

$$P1 = 0,2 \cdot \frac{25.400 - 254 \cdot NI}{NI} \quad y$$

L es una constante que vale cero si la precipitación es menor que el umbral de escorrentía y uno en caso contrario.

La disponibilidad hídrica en el área de recepción se calcula mediante la ecuación [3]: $DESP = P + E_{s1} - E_{s2}$. Los dos primeros sumandos son conocidos por lo que únicamente habremos de cuantificar la escorrentía que escapa de la unidad sistematizada (E_{s2}) para tener resuelto el problema.

En lo que respecta al término E_{s1} basta con significar que suponemos un reparto uniforme de la aportación dentro del área receptora, de manera que:

$$E_{s1} = L \cdot \frac{(P - P1)^2}{P + 4 \cdot P1} \cdot \frac{S_1}{S_2} \quad (\text{ en mm })$$

Para calcular E_{s2} vamos a hacer uso de la hipótesis de desagüe instantáneo. A su vez, en este análisis hemos de considerar el proceso de generación de escorrentía en las dos áreas de la unidad, ya que la lluvia neta de ambas zonas confluye en el área colectora. Si comparamos las condiciones de infiltración en el área de impluvio y en el área de recepción, nos podemos encontrar dos situaciones bien distintas:

Caso I: $NI \geq NR$

El número de curva del área de impluvio es mayor (o igual) que el número de curva del área de recepción, o lo que es lo mismo: el área productora tiene un umbral de escorrentía menor (o igual) que el área colectora.

En esta situación y sin necesidad de alcorque el área de recepción tiende a captar agua del área de impluvio. La preparación del suelo resulta favorable a la infiltración en las áreas receptoras, proceso que se puede incentivar construyendo pocetas o alcorques.

Caso II: $NI < NR$

El número de curva del área de impluvio es menor que el del área de recepción con lo que la escorrentía tiende a ser mayor en esta última zona. La conveniencia (por no decir necesidad) de incluir muretas o alcorques en el área colectora para tratar de corregir este defecto resulta evidente.

En ambos casos y de acuerdo con la función establecida para el almacenaje y el desagüe, la escorrentía que se pierde de la unidad sistematizada puede evaluarse mediante esta expresión:

$$E_{s2} = \begin{cases} 0 \frac{1}{m^2} & \text{si trata de escurrir de la unidad menos volumen de} \\ & \text{agua que la capacidad de embalse del área receptora} \\ \frac{MAX - CAPA}{S_2} & (\text{ mm }), \text{ si MAX resulta mayor que CAPA} \end{cases}$$

en donde MAX es lo que escurriría de la unidad sistematizada si la capacidad del microembalse fuese nula (es decir: CAPA = 0 l).

A la hora de obtener este último dato es cuando hay que distinguir entre las dos situaciones antes descritas.

- A - Cálculo de MAX en el primer caso (NI ≥ NR)

De acuerdo con el modelo base se realiza una ponderación según superficies para obtener el número de curva promedio (NM) de la unidad sistematizada.

$$NM = \frac{NI \cdot S_1 + NR \cdot S_2}{S_1 + S_2}$$

Con este dato se determina el umbral de escorrentía de la unidad:

$$P_0 = 0,2 \cdot \frac{25.400 - 254 \cdot NM}{NM}$$

y se obtiene la escorrentía máxima que puede escurrir de la sistematización para alcorque nulo por aplicación directa del método del número de curva:

$$MAX = K \cdot \frac{[P - P_0]^2}{P + 4 \cdot P_0} \cdot (S_1 + S_2) \quad (\text{en l}) \quad [41a]$$

en donde K es una constante que vale uno (o cero) según que la precipitación rebase (o no) el umbral de escorrentía promedio de la unidad (P₀).

- B - Cálculo de MAX en el segundo caso (NI < NR)

La escorrentía que se escapa de la unidad si no creamos un microembalse del tamaño adecuado se obtiene agregando a la lluvia neta generada en el área de recepción la correspondiente al área de impluvio, es decir:

$$MAX = LL \cdot \frac{[P - P_R]^2}{P + 4 \cdot P_R} \cdot S_2 + L \cdot \frac{[P - P_I]^2}{P + 4 \cdot P_I} \cdot S_1 \quad (\text{en l}) \quad [41b]$$

en donde todos los términos han sido ya enunciados a excepción de

LL que vuelve a ser una constante que vale uno o (caso) según se supere (o no) el umbral de escorrentía del área de recepción (PR), dato que se calcula como de costumbre:

$$PR = 0,2 \cdot \frac{25.400 - 254 \cdot NR}{NR}$$

En un primer momento puede resultar extraño el hecho de que utilicemos dos procedimientos distintos para evaluar un mismo término (MAX). Pero si se analizan las circunstancias que concurren en las dos situaciones, se comprenderá la conveniencia del tal distingo.

En el primer caso, parte del agua de escorrentía surgida en el área de impluvio se infiltra en el área colectora como consecuencia de su mayor capacidad de infiltración y sin necesidad de alcorque. Este proceso lo evaluamos a través de la ponderación por superficies que propone el método del número de curva. La formación de los primeros charcos en el área de recepción se adelanta respecto al umbral de escorrentía que posee (PR) debido a las aguas alóctonas que recibe desde el área de impluvio. Pero interpretamos que se retrasa respecto del comienzo de la escorrentía en el área productora en la diferencia de umbrales (P0 - P1) que existe entre el conjunto de la unidad y el área de impluvio.

En el segundo caso hay que desechar tal posibilidad, de manera que la ponderación no resulta apropiada. Ello conduce a otro algoritmo de cálculo en el que MAX se obtiene como suma de las escorrentías parciales que se producen en el área de impluvio y en el área de recepción , tal y como acabamos de reflejar mediante ecuaciones.

En resumen, la disponibilidad hídrica del área colectora se halla mediante la ecuación:

$$DESP = P + E_{s1} - E_{s2} = P + L \cdot \frac{(P - P1)^2 \cdot S_1}{P + 4 \cdot P1 \cdot S_2} - \begin{cases} 0 & (\text{si } MAX \leq CAPA) \\ \frac{MAX - CAPA}{S_2} & , \text{ en caso contrario} \end{cases}$$

MAX se calcula según el caso:

[42]

$$\text{MAX} = K \cdot \frac{(P - P_0)^2}{P + 4 \cdot P_0} \cdot (S_1 + S_2), \quad \text{si } NI \geq NR \quad [41a]$$

$$\text{MAX} = LL \cdot \frac{(P - PR)^2}{P + 4 \cdot PR} \cdot S_2 + L \cdot \frac{(P - P_1)^2}{P + 4 \cdot P_1} \cdot S_1, \quad \text{si } NI < NR \quad [41b]$$

Si retomamos la terminología de los capítulos precedentes, la condición fijada por la igualdad $\text{MAX} = \text{CAPA}$ equivale a una precipitación límite (P_2). Para un aguacero excesivo ($P > P_2$) tenemos:

- A - Si $NI \geq NR$;

$$\text{DESP} = P + L \cdot \frac{(P - P_1)^2}{P + 4 \cdot P_1} \cdot \frac{S_1}{S_2} - K \cdot \frac{(P - P_0)^2}{P + 4 \cdot P_0} \cdot \frac{S_1 + S_2}{S_2} + \frac{\text{CAPA}}{S_2} \quad [42a]$$

- B - Si $NI < NR$;

$$\text{DESP} = P + L \cdot \frac{(P - P_1)^2}{P + 4 \cdot P_1} \cdot \frac{S_1}{S_2} - LL \cdot \frac{(P - PR)^2}{P + 4 \cdot PR} - L \cdot \frac{(P - P_1)^2}{P + 4 \cdot P_1} \cdot \frac{S_1}{S_2} + \frac{\text{CAPA}}{S_2}$$

$$\text{DESP} = P - LL \cdot \frac{(P - PR)^2}{P + 4 \cdot PR} + \frac{\text{CAPA}}{S_2} \quad [42b]$$

Para una precipitación inferior a la límite, la disponibilidad hídrica se calcula teniendo en cuenta que no se produce escorrentía fuera de la unidad ($E_{S_2} = 0$), es decir:

$$\text{DESP} = P + L \cdot \frac{(P - P_1)^2}{P + 4 \cdot P_1} \cdot \frac{S_1}{S_2} \quad [42c]$$

Todo aguacero que no supere el umbral de escorrentía del área de impluvio ($P \leq P_1$) es una precipitación débil. El área productora no suministra agua de escorrentía al área de recepción.

Si el umbral de escorrentía del área supuestamente colectora se ve superado por el aguacero ($P > P_R$ siendo $P \leq P_1$) se llega a la situación paradójica de que la disponibilidad hídrica en el área de recepción será inferior a la precipitación caída, cantidad que aprovecha el área de impluvio en su totalidad. Para evitar este contrasentido hay que dotar al área receptora de un microembalse de tamaño conveniente.

La capacidad mínima (CAP_{MIN}) que debe tener el alcorque en los casos en que $NI < NR$ debe ser tal que la escorrentía fuera de la unidad sistematizada no se inicie antes que la lluvia neta en el área de impluvio. Para ello se debe cumplir:

$$CAP_{MIN} = \frac{\left[P_1 - P_R \right]^2}{P_1 + 4 \cdot P_R} \cdot S_2 \quad [43]$$

en donde la expresión de la igualdad representa los litros de "escorrentía" que se producen en el área de recepción ante un aguacero cuya precipitación coincida con el umbral del área de impluvio ($P = P_1$).

De acuerdo con la nomenclatura del método del número de curva, la precipitación a partir de la cual se inicia la escorrentía directa se denomina umbral de escorrentía. Con la inclusión de un microembalse en la sistematización estamos aumentando las posibilidades de endorreísmo en la unidad. De hecho, la escorrentía que se pierde (E_{S_2}) no comienza para ninguno de los umbrales que conocemos (P_1 y P_R) o que hemos calculado (P_0). Cabe identificar a la precipitación límite (P_2) con el umbral de escorrentía de la unidad sistematizada y asignar un número de curva equivalente (NEQ) a la sistematización, número que debe satisfacer la relación :

$$P_2 = 0,2 \cdot \frac{25.400 - 254 \cdot NEQ}{NEQ} \quad \longleftrightarrow \quad NEQ = \frac{5080}{P_2 + 50,8} \quad [44]$$

Para hallar la precipitación límite (o umbral de escorrentía, P2) hay que imponer la condición: MAX = CAPA.

Nuevamente hay que distinguir entre los dos casos que venimos contemplando hasta ahora: caso I \longleftrightarrow (NI \geq NR)

caso II \longleftrightarrow (NI < NR)

Para el primer caso:

$$\text{MAX} = \text{CAPA} \Leftrightarrow K \cdot \frac{[P - P_0]^2}{P + 4 \cdot P_0} \cdot (S_1 + S_2) = \text{CAPA}$$

siendo P la precipitación umbral y K = 1.

Al operar nos queda:

$$P^2 - \frac{2 \cdot P_0 \cdot (S_1 + S_2) + \text{CAPA}}{S_1 + S_2} \cdot P - \frac{4 \cdot \text{CAPA} \cdot P_0}{S_1 + S_2} + P_0^2 = 0$$

Luego:

$$P = P_2 = P_0 + \frac{\text{CAPA}}{2 \cdot (S_1 + S_2)} + \sqrt{\left[P_0 + \frac{\text{CAPA}}{2 \cdot (S_1 + S_2)} \right]^2 + \frac{4 \cdot \text{CAPA} \cdot P_0}{S_1 + S_2} - P_0^2} \quad [44a]$$

Para el segundo caso:

$$\text{MAX} = \text{CAPA} \Leftrightarrow LL \cdot \frac{[P - P_R]^2}{P + 4 \cdot P_R} \cdot S_2 + L \cdot \frac{[P - P_1]^2}{P + 4 \cdot P_1} \cdot S_1 = \text{CAPA}$$

Dependiendo del tamaño del microembalse la ecuación en P que tenemos que resolver es de segundo o de tercer grado.

* Si CAPA \leq CAPMIN \Rightarrow LL = 1 y L = 0 \Rightarrow ec. en P de 2^o grado

* Si CAPA > CAPMIN \Rightarrow LL = 1 y L = 1 \Rightarrow ec. en P de 3^or grado

□ Para CAPA \leq CAPMIN nos queda:

$$\frac{\left[P - PR \right]^2}{P + 4 \cdot PR} \cdot S_2 = CAPA$$

↓

$$P^2 - \frac{2 \cdot PR \cdot S_2 + CAPA}{S_2} \cdot P - \frac{4 \cdot CAPA \cdot PR}{S_2} + PR^2 = 0 \implies$$

$$P = P_2 = PR + \frac{CAPA}{2 \cdot S_2} + \sqrt{\left[PR + \frac{CAPA}{2 \cdot S_2} \right]^2 + \frac{4 \cdot CAPA \cdot PR}{S_2} - PR^2} \quad [44b]$$

⊙ Para $CAPA > CAPMIN$ tenemos que resolver la siguiente igualdad:

$$\frac{\left[P - PR \right]^2}{P + 4 \cdot PR} \cdot S_2 + \frac{\left[P - P_1 \right]^2}{P + 4 \cdot P_1} \cdot S_1 = CAPA$$

Al desarrollar esta expresión nos queda un polinomio de tercer grado en P cuya única raíz real es la solución buscada ($P = P_2$).

$$FAC1 \cdot P^3 + FAC2 \cdot P^2 + FAC3 \cdot P + FAC4 = 0 \quad [44c]$$

en donde: $FAC1 = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2}$

$$FAC2 = \frac{4 \cdot P_1 - 2 \cdot PR}{S_1} + \frac{4 \cdot PR - 2 \cdot P_1}{S_2} - \frac{CAPA}{S_1 \cdot S_2}$$

$$FAC3 = \frac{PR^2 - 8 \cdot PR \cdot P_1}{S_1} + \frac{P_1^2 - 8 \cdot P_1 \cdot PR}{S_2} - \frac{4 \cdot (P_1 + PR) \cdot CAPA}{S_1 \cdot S_2}$$

$$FAC4 = \frac{4 \cdot P_1 \cdot PR^2}{S_1} + \frac{4 \cdot PR \cdot P_1^2}{S_2} - \frac{16 \cdot P_1 \cdot PR \cdot CAPA}{S_1 \cdot S_2}$$

La raíz del polinomio se obtiene por aproximaciones sucesivas y representa el umbral de escorrentía o precipitación límite de la unidad sistematizada ($P = P_2$).

El método del número de curva considera tres posibles situaciones de humedad en el suelo al comienzo de un aguacero:

- condición I (suelo seco)
 - condición II (situación intermedia)
 - condición III (suelo húmedo)
- } (véase el
anexo IV)

Según sea esta condición previa de humedad el volumen de escorrentía que genera un mismo chubasco varía notablemente, siendo muy superior si llueve sobre mojado.

Las tablas que facilita el Servicio de Conservación de Suelos Americano para determinar el número de curva suponen una situación intermedia de humedad (condición II). Si el suelo está seco o húmedo hay que convertir el número de curva hallado por las tablas a la situación de humedad apropiada (I o III). A tal fin el S.C.S. facilita unas ecuaciones y unas tablas de conversión (anexo IV).

La consecuencia inmediata a extraer de este hecho es que las ecuaciones que venimos desarrollando deben ser planteadas para las tres condiciones de humedad que contempla el método, o dicho de otra manera: para los tres números de curva asociados [$N(I)$, $N(II)$ y $N(III)$]. Como quiera que repetir tales ecuaciones no aporta novedad alguna vamos a omitirlas. Tan sólo queremos indicar que la capacidad mínima del alcorque ($CAPMIN$) se refiere a la situación más desfavorable de las tres posibles.

Por otro lado, el modelo MODIPE no contempla la posibilidad de que el área de impluvio y el área de recepción puedan encontrarse en condiciones previas de humedad diferentes. La situación de humedad queda determinada por la lluvia total caída durante los cinco días anteriores al aguacero en estudio, de acuerdo con el método del número de curva (véase el anexo IV) y sin considerar la redistribución que por escorrentía superficial pueda haberse producido dentro de la unidad sistematizada.

Otra cuestión importante que conviene aclarar para evitar equívocos a la hora de utilizar el método del número de curva o el

modelo MODIPE se refiere al hecho - en principio sorprendente - de que el factor 'tiempo' no intervenga en las ecuaciones.

El modelo de los complejos hidrológicos no trabaja con intensidades de lluvia ni con pluviogramas sino directamente con la precipitación total del aguacero. Sin embargo, el factor tiempo está presente en el planteamiento y en los ajustes realizados para fijar los números de curva. De hecho, el modelo ha sido calibrado con precipitaciones diarias por lo que debe ser usado para aguaceros que tengan una duración igual o inferior a 24 horas. En el caso de episodios de lluvia que abarquen más de un día hay que dividirlos y modificar con cada nuevo día la condición previa de humedad (de acuerdo con los límites de precipitación acumulada [P_5] establecidos).

En definitiva, se puede afirmar que la "desaparición" del factor tiempo es sólo ficticia. No debemos olvidar el hecho de que el modelo ha sido calibrado para precipitaciones diarias. Estos datos se pueden obtener de cualquier estación meteorológica (tanto si es de primer, de segundo o de tercer orden) lo que supone una sustancial ventaja a la hora de aplicar el método en una ladera, puesto que siempre podremos encontrar una estación cercana y representativa del lugar en estudio.

Al aplicar el modelo MODIPE a nivel mensual, anual o plurianual con vistas a estudios microclimáticos en ladera, suele ocurrir que los datos pormenorizados de todas las precipitaciones diarias a lo largo del año no están disponibles. Si se analiza el contenido de la base de datos DCAS que ofrece el Instituto Nacional de Meteorología, los pluviogramas facilitan para cada mes la precipitación total (P_m), la precipitación máxima diaria (M_m) y el número de días de lluvia (D_m). [Véase el anexo VI]. Esta información es insuficiente para poder aplicar directamente el método del número de curva ya que solamente se conoce una precipitación diaria (M_m).

En el anexo VII se describe un procedimiento mediante el cual se puede sortear esta dificultad. En esencia el método consiste en

transformar los tres datos antes mencionados en precipitaciones virtuales equivalentes. La distribución de precipitaciones que se define - además de satisfacer los datos de partida - genera un volumen de escorrentía superficial medio, comprendido entre el que provocaría la distribución más favorable y el que originaría la distribución más desfavorable para la formación de escorrentía. Para más detalles, remitimos al lector al anexo VII.

Con el fin de comparar la situación de partida con la sistematización primaria proyectada, un dato importante a tener en cuenta es el número de curva de la ladera actual (NAC). Sólo así podremos evaluar la eficacia de las labores planteadas.

La disponibilidad hídrica de la ladera puede evaluarse mediante la ecuación [6]:

$$\text{ANTES} = P - M \cdot \frac{[P - \text{PAC}]^2}{P + 4 \cdot \text{PAC}} \quad [45]$$

en donde: ANTES es la cantidad de agua que se infiltra en la ladera antes de la sistematización (en l/m^2)

P es la precipitación del chubasco (en mm)

PAC es el umbral de escorrentía de la ladera degradada (en mm) que se calcula por medio de la expresión:

$$\text{PAC} = 0,2 \cdot \frac{25.400 - 254 \cdot \text{NAC}}{\text{NAC}}$$

M es una constante que vale cero si la precipitación es inferior al umbral PAC y uno en el caso contrario.

Desde el punto de vista de la economía del agua la sistematización primaria proyectada tiene pleno sentido siempre que consigamos que la disponibilidad hídrica en la unidad sistematizada sea mayor que en la ladera actual. Para ello la precipitación límite de la sistematización debe ser mayor que el umbral de escorrentía de la ladera degradada, es decir:

$$\text{PROM} \geq \text{ANTES} \iff P2 \geq \text{PAC}$$

Si por la aridez del clima las mareas en la repoblación se producen por sequía fisiológica durante el estío, la situación será sobre todo favorable en el siguiente supuesto:

$$PROM \geq ANTES \text{ y } - \text{ además } - \text{ DESP } > P$$

Gracias a la escorrentía superficial que se produce en el área de impluvio el área colectora infiltra un volumen de agua superior a la lámina de agua registrada ($DESP > P$). Si a esta situación beneficiosa agregamos una mejoría en las condiciones edáficas del terreno desde el punto de vista de su capacidad de retención de agua, habremos acertado plenamente en la preparación del suelo. Como situación extrema podemos llegar a conseguir lo siguiente:

$$PROM = P \text{ siendo } DESP > P$$

En este caso habremos diseñado una microcuenca endorreica que acumula toda la lluvia neta en el microembalse sin que se produzcan vertidos. Esta situación resulta adecuada siempre que los tiempos de embalse no se prolonguen en exceso para el repoblado.

De acuerdo con nuestro modelo y como situación límite en la que todavía la preparación del suelo resulta admisible, tenemos:

$$DESP = ANTES$$

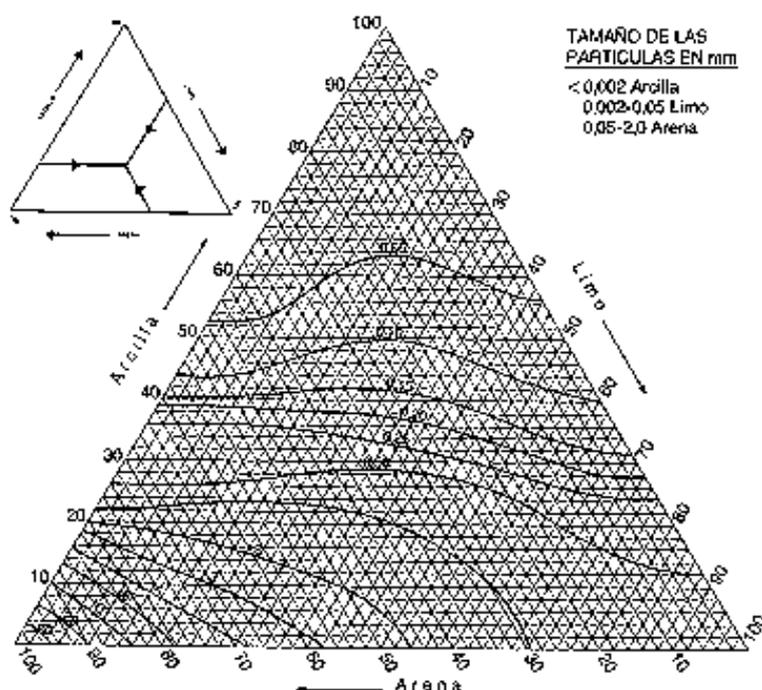
Se trata de una situación neutra. En la ladera degradada y en el área de recepción las disponibilidades hídricas son iguales. La preparación del suelo no se justifica desde el punto de vista de la economía del agua a nivel de superficie pero puede ser plenamente acertada por otras razones: mejoría del perfil edáfico, aumento de su capacidad de retención de agua, eliminación de la vegetación preexistente, disminución de la competencia para el repoblado, simplificación de las labores de plantación, etc.

Para estimar el tiempo máximo de embalse del área de recepción una vez finalizado el chubasco podemos trabajar con la siguiente inecuación:

$$t_{\text{máx}} \leq \frac{H}{f_{\text{mín}}}$$

en donde: H es la altura de los muretes del microembalse (dato que está relacionado con CAPA) y f_{\min} es la tasa de infiltración mínima en el área de recepción (en el vaso del microembalse), valor que coincide con el parámetro f_c del modelo de Horton.

Si no se dispone de este último dato, se puede estimar f_{\min} a partir de la conductividad hidráulica a saturación (k_s) del horizonte más impermeable del perfil. El diagrama textural de la figura sirve para acotar la conductividad (o permeabilidad) a saturación en terrenos sin pedregosidad.



*Conductividad hidráulica a saturación (en cm/h)
en función de la granulometría del horizonte*

Conviene tener presente que la tasa mínima de infiltración es menor que la conductividad hidráulica por las interferencias que provoca el aire confinado en ciertos poros del suelo. A este respecto, Bouwer (1966) propone la relación orientativa siguiente: $f_{\min} = 0,5 \cdot k_s$, con la que se puede acotar t_{\max} .

A modo de resumen, vamos a recordar los datos de entrada que requiera el modelo que hemos desarrollado en este capítulo:

S_1 = área de impluvio (en m^2)

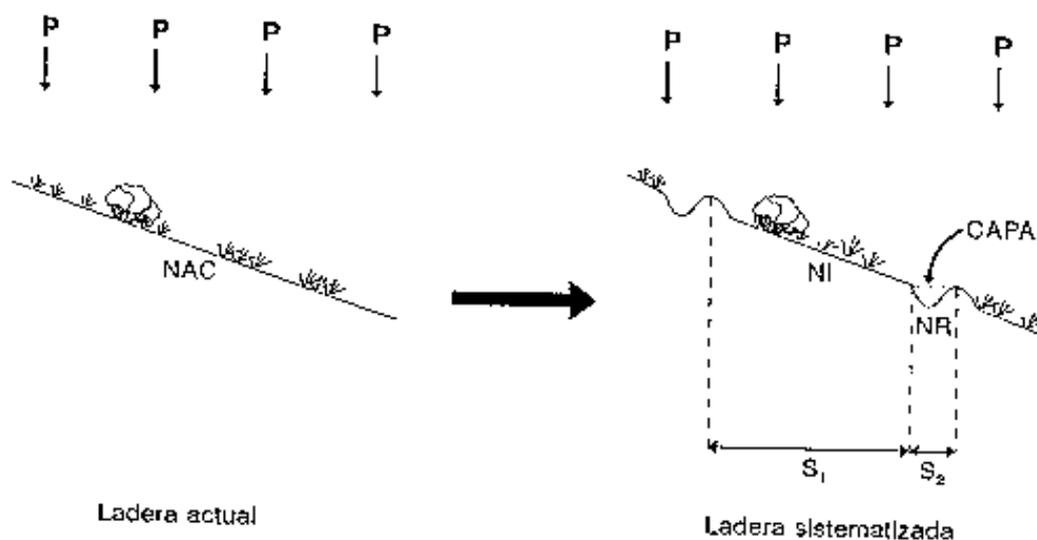
S_2 = área de recepción (en m^2)

CAPA = capacidad de embalse del área de recepción

NAC(2) = número de curva de la ladera actual (en condición II de humedad)

NI(2) = número de curva del área de impluvio (en condición II)

NR(2) = número de curva del área de recepción (en condición II)



Datos de entrada del modelo MODIPE

Para poder aplicar el modelo MODIPE vamos a acudir en un principio a las tablas que facilita el Servicio de Conservación de Suelos Americano, a falta de una propias que se ajusten mejor a la escala espacial que manejamos con las sistematizaciones primarias.

En el anexo IV aparecen estas tablas en la versión más reciente y extensa que conocemos (Ponca, 1989).

Por otro lado y en el anexo V tratamos de orientar al usuario de MODIFE en la elección de los números de curva a utilizar según vaya a ser la preparación del suelo. También y en el mismo anexo, comparamos los números de curva de la ladera sin intervención con los de la ladera sistematizada e interpretamos el significado de tales combinaciones numéricas.

7.3 Programa MODIPE. Manual de usuario

7.3.1. Finalidad

Este programa permite calcular las disponibilidades hídricas en un punto de una ladera originadas por un aguacero aislado o por una serie de aguaceros. También puede operar a nivel anual o supranual.

Para ello hay que definir las características hidrológicas y topográficas de la ladera así como las precipitaciones a estudiar. A partir de estos datos, el programa cuantifica la escorrentía superficial generada por los aguaceros y estima la altura de agua que queda residente en un punto de la ladera. Este valor refleja la disponibilidad hídrica en ese punto.

El programa contempla la posibilidad de laderas sistematizadas y distingue en tal caso entre zonas que reciben escorrentía (áreas de recepción) y zonas que aportan escorrentía (áreas de impluvio).

Como resultado final se obtiene la cantidad de agua (en l/m^2) disponible en un punto de la ladera (tanto si es un punto favorecido como desfavorecido a acumular agua por razones intrínsecas y/o de contorno). Estos resultados se ofrecen a través de la pantalla del ordenador y pueden ser sacados por impresora apretando a la tecla

Impr
Print

.

7.3.2. Características generales

Nombre del programa: MODIPE.EXE

Lenguaje: BASIC

Fecha de realización: comienzo: febrero de 1992

conclusión: febrero de 1995

Autor: Andrés Martínez de Azagra Paredes

Tamaño del programa: 80.000 bytes

7.3.3. Forma de ejecución

Se trata de un programa conversacional de manejo muy sencillo que está ideado para ser corrido en cualquier ordenador personal compatible. Basta con escribir MODIPE en la línea de comandos del MS-DOS y pulsar a la tecla  para entrar en el programa MODIPE.

A través de la pantalla el programa avisa en todo momento al usuario sobre los datos de entrada que precisa para realizar los cálculos.

Las teclas generales de funcionamiento son:

 =  = son dos teclas equivalentes que sirven para introducir datos numéricos o alfanuméricos en el programa. Estas dos teclas las vamos a simbolizar mediante: <←>

 = debe ser pulsada si la respuesta es afirmativa (Sí)

 = debe ser pulsada si la respuesta es negativa (No)

A estos pulsadores de carácter general hay que agregar las teclas correspondientes a los datos numéricos sobre la ladera o la precipitación así como ciertas opciones que el usuario elige mediante números.

En estos casos y cuando el programa así lo solicite hay que teclear el valor de la variable pedida en las unidades apropiadas (en metros cuadrados, milímetros, litros o sin unidad ,según el caso). Una vez aparezca el valor deseado en pantalla basta con apretar la tecla <←> para que el programa reciba el mensaje y siga operando. En el caso de que nos hayamos equivocado al teclear el valor y antes de pulsar <←> debemos corregir el texto o la cifra que aparece en pantalla por medio de las teclas:

 o 

Ante ciertos descuidos en la introducción de datos, el programa no los acepta y vuelve a demandar el dato correcto al

usuario.

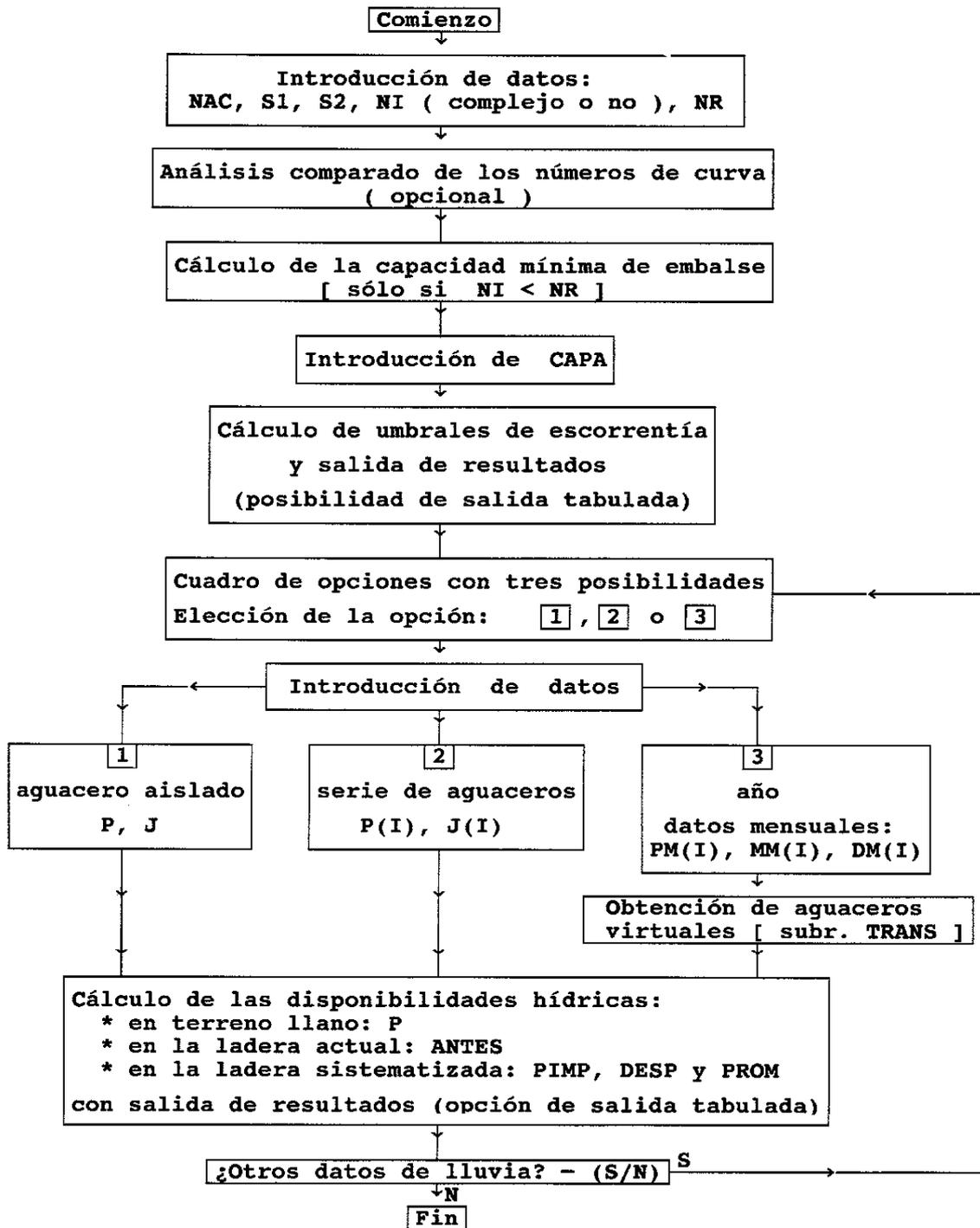
Los valores numéricos que tengan decimales deben escribirse con punto decimal y no con coma (p.ej.: 0.5 y no: 0,5).

La ejecución del programa se detiene en varios momentos. En unos casos a la espera de que el usuario introduzca un valor solicitado, pero en otros casos para ofrecer resultados parciales por el monitor. Estos resultados pueden ser sacados por impresora pulsando la tecla

Imp:
Part

En estos casos y para proseguir con la ejecución del programa basta con pulsar cualquier tecla.

7.3.4. Organigrama



7.3.5. Datos de entrada

El programa MODIPE solicita:

- * el número de curva de la ladera actual (en cond. II), NAC
- * el área de impluvio, S1 (en m^2)
- * el área de recepción, S2 (en m^2)
- * el número de curva del impluvio (en cond. II), NI
[se concibe la posibilidad de un área de impluvio con hasta seis complejos hidrológicos distintos; N1, N2, N3, N4, N5 y N6]
- * el número de curva de la recepción (en cond. II), NR
- * la capacidad de embalse, CAPA (en l)
- * los datos sobre las lluvias y las condiciones previas de humedad del terreno

A este respecto caben tres posibilidades distintas:

- a- Para un aguacero aislado;
 - * la precipitación caída, P (en mm)
 - * la condición previa de humedad, J [1, 2 o 3]
- b- Para una serie de aguaceros consecutivos
 - * la precipitación de cada uno, P(I) (en mm)
 - * las condiciones previas de humedad, J(I)
- c- Para un año
 - * la precipitación mensual, PM(I) (en mm)
 - * la precipitación máxima diaria del mes, MM(I) (mm)
 - * el número de días de precipitación, DM(I)

7.3.6. Secuencia general del programa

Al escribir la palabra MODIPE y pulsar <← > aparece la pantalla de presentación del programa. Apretando cualquier tecla el programa prosigue. En primer lugar solicita el número de curva de la ladera actual en condiciones medias de humedad, el tamaño del área de impluvio y del área de recepción así como sus números de curva correspondientes en igual condición de humedad.

Con estos datos el programa realiza los primeros cálculos. Existe la posibilidad de un análisis comparado de los números de curva de la ladera en el que se aconseja sobre la creación (o no) de trampas de agua en el área de recepción. Para el caso de que

estos microembalses sean convenientes el programa indica el tamaño mínimo que deben tener.

Llegado a este punto, MODIPE solicita la capacidad de embalse superficial que va a tener el área de recepción, con lo que finalizan los datos de entrada sobre la ladera actual y su proyectada sistematización.

MODIPE obtiene los valores clave que definen el comportamiento hidrológico de la ladera actual y de la ladera sistematizada para las tres condiciones de humedad que contempla el método del número de curva. Una vez realizados estos cálculos (que en ciertos casos pueden demorarse unos cuantos segundos) se ofrece por pantalla un resumen de los mismos. Este resumen se puede obtener tabulado si así se desea con tan sólo pulsar <1> seguido de <←>.

Una vez definidas las características de la ladera actual y de la sistematización proyectada, el programa oferta tres opciones diferentes: analizar el comportamiento de la ladera para un aguacero (<1>); para una serie de aguaceros (<2>) o para un año (<3>).

En la opción que estudia un aguacero aislado, el programa requiere dos datos: el valor de la precipitación y las condiciones previas de humedad del suelo antes del aguacero (1, 2 ó 3 según el método del número de curva).

Si se analiza una serie de aguaceros hay que introducir el valor de cada precipitación aislada y la condición previa de humedad.

Por último, si el estudio es anual el programa precisa 36 datos de entrada; a saber: la precipitación mensual, la precipitación máxima diaria del mes y el número de días de precipitación apreciable (tres datos por mes). Estos datos, muy fáciles de obtener de cualquier estación meteorológica, pueden ser reemplazados por la serie completa de aguaceros acaecidos en un año, caso de que se disponga de tal información y si se considera oportuno.

Con los datos de precipitación acaecidos, el programa opera y ofrece finalmente las disponibilidades hídricas que las entradas de lluvia van a generar en los distintos lugares de la ladera (situación actual, área de recepción, área de impluvio y promedio dentro de la ladera sistematizada).

Una vez realizados los cálculos para la opción de lluvia elegida, el programa permite más simulaciones con la ladera descrita. Si esa es la voluntad del usuario, el programa retorna a la pantalla con las tres opciones de entrada de precipitaciones.

En caso contrario el programa concluye los cálculos y vuelve a la línea de comandos del MS-DOS. Si se desea estudiar el comportamiento de otra ladera basta con escribir nuevamente MODIPE y pulsar <←> para reanudar el proceso descrito.

7.3.7. Salida de resultados

El programa MODIPE opera de acuerdo con las ecuaciones desarrolladas en el tema anterior por lo que omitimos su enumeración en este manual.

Como resultado principal el programa obtiene las disponibilidades hídricas de la ladera:

- * sin sistematización primaria: ANTES [ec. 45] y
- * con la sistematización proyectada;
 - a) en el área de impluvio: PIMP [ec. 40]
 - b) en el área de recepción: DESP [ecs. 42 +

]
 - c) en la unidad sistematizada: PROM [ec. 5]

Como resultados complementarios que el programa refleja en pantalla, tenemos:

-1- para las tres opciones (aguacero, serie de chubascos o año)

* los números de curva y sus umbrales de escorrentía (para las tres condiciones de humedad que contempla el método del número de curva [$J = 1, 2$ y 3])

- a) en la ladera sin actuar: $NAC(J) \leftrightarrow PAC(J)$
- b) en el área productora: $NI(J) \leftrightarrow P1(J)$
- c) en el área receptora: $NR(J) \leftrightarrow PR(J)$
- d) en la unidad sistematizada: $NEQ(J) \leftrightarrow P2(J)$ [ecs. 44]

* la capacidad mínima aconsejada para el microembalse (sólo si $NI < NR$): CAPMIN [ec. 43]

* una comparación interpretada de los números de curva [véase el anexo V]

-2- para un aguacero aislado

* la precipitación máxima disponible en el área de recepción si no se produce escorrentía fuera de la unidad, es decir: si el microembalse fuese suficientemente grande: ALCOR (en mm)

* la capacidad mínima del alcorque para retener toda la escorrentía: CAPAL (en l)

* la altura mínima de represas correspondiente: ALTU (en mm)

* la precipitación máxima disponible en el área de recepción (supuesta el área de impluvio impermeable y un alcorque de tamaño suficiente): MAXI (en mm)

* el tamaño mínimo del alcorque para tal menester: LIMIT (en l)

-2- para una serie de aguaceros consecutivos

* la precipitación total: SUM1 (en mm)

* el número de aguaceros analizado: UA

* el número de chubascos que originan escorrentía en la ladera actual (UZ), y en la sistematización; aquí se distingue entre el número de episodios de lluvia que provocan escorrentía en el área de impluvio (UB) y fuera de la unidad (UC)

* la capacidad mínima del alcorque para retener toda la escorrentía (CAPAL)

-3- para un año

* la precipitación anual: SU1 (en mm)

* la precipitación máxima diaria considerada: PMAX (en mm)

* el número de días de lluvia en el año: SU2

* las dos precipitaciones virtuales de cada mes (PV1 y PV2) así como el número de veces que ocurran (N1 y N2, respectivamente)

* las condiciones previas de humedad de cada mes (J), basadas en la precipitación total media caída en cinco días sucesivos (P5)

* la capacidad mínima del alcorque para conseguir endorreísmo en la unidad sistematizada (CAPAL)

Todos estos resultados van apareciendo a través del monitor en distintas pantallas que pueden ser sacadas por impresora mediante la tecla

Imp Pant

. Otra posibilidad consiste en captar tales imágenes con la ayuda de conocidos paquetes informáticos.

7.3.8. Ejemplos numéricos

Vamos a considerar una ladera degradada cuyo número de curva en condición dos (<2>) vale 80.

La sistematización consiste en microcuencas formadas por un área de impluvio de 8 m² y por un área de recepción de 2 m² con una capacidad de embalse de 100 l, lo que supone una altura de los muretes de 50 mm.

La preparación del terreno es puntual y afecta únicamente al área de recepción, de manera que el número de curva del área de impluvio en condición dos (<2>) coincida con el de la ladera actual (<80>)

En función del suelo, de la labor y del tempero existente al realizar la misma, y de las enmiendas que se hagan , el número de curva del área de recepción puede disminuir o aumentar respecto del existente en la ladera actual. Vamos a considerar un caso favorable en el que el número de curva tras la preparación del suelo valga 70.

La ladera se encuentra situada en las proximidades de Albox (Almería), siendo ésta la estación a estudiar.

Se van a analizar tres episodios de lluvia diferentes:

1) un aguacero aislado de 50 mm en condición <1> de humedad

2) una serie de tres aguaceros consecutivos:

primer aguacero: 30 mm en condición <1> de humedad

segundo " : 30 mm en condición <2> de humedad

tercer aguacero: 30 mm en condición <3> de humedad

3) el año 1989

mes	Prec. mensual (en mm)	prec. máx. diaria (en mm)	días de precipitación apreciable
enero	67.9	23.0	6
febrero	64.0	35.0	6
marzo	89.8	39.0	5
abril	13.7	11.0	3
mayo	11.5	4.8	5
junio	14.7	12.0	4
julio	18.5	12.0	2
agosto	30.5	28.0	3
septiembre	68.9	62.2	4
octubre	115.5	95.0	4
noviembre	46.6	19.0	8
diciembre	87.1	15.5	11

La secuencia de operaciones a realizar para correr el programa y las pantallas y resultados que irán apareciendo, se enumeran a continuación:

En la línea de comandos del MS-DOS y en la unidad y el directorio donde se encuentre el programa MODIPE.EXE escribimos;

MODIPE <←>

Pantalla de presentación <←>

Número de curva de la ladera actual en condición II = ? 80 <←>

Área de impluvio (en m²) = ? 8 <←>

Área de recepción (en m²) = ? 2 <←>

¿Área de impluvio formada por más de un complejo hidrológico? - (S/N)?

N <←>

Número de curva del área de impluvio en condición II = ? 80 <←>

Número de curva del área de recepción en condición II = ? 70 <←>

Si desea un análisis comparado de los números de curva de la ladera pulse <I>? 1 <←>

Pantalla del análisis comparado

Impe
Pant

 <←>

Capacidad de embalse del área de recepción (en l) = ? 100 <←>

Pantalla con los datos de la ladera y los umbrales de escorrentía

Si desea ver estos resultados tabulados pulse <I>? 1 <←>

Pantalla de resultados tabulados

Impr
Pant

 <←>

Pantalla de opciones de lluvia

Opción? 1 <←>

Precipitación del aguacero (en mm) = ? 50 <←>

Condición previa de humedad en el suelo = ? 1 <←>

Pantalla escrita con los datos de entrada y los resultados

Si desea ver estos resultados tabulados pulse <1>? 1 <←>

Pantalla de resultados tabulados

Impr
Pant

 <←>

¿Desea realizar más cálculos con la sistematización establecida? - (S/N)? S <←>

Pantalla de opciones de lluvia

Opción? 2 <←>

Precipitación del aguacero (en mm) = ? 30 <←>

Condición previa de humedad en el suelo = ? 1 <←>

Pantalla de resultados escrita

¿Desea trabajar con otro aguacero? - (S/N)? S <←>

Precipitación del aguacero (en mm) = ? 30 <←>

Condición previa de humedad en el suelo = ? 2 <←>

Pantalla de resultados escrita

¿Desea trabajar con otro aguacero? - (S/N)? S <←>

Precipitación del aguacero (en mm) = ? 30 <←>

Condición previa de humedad en el suelo = ? 3 <←>

Pantalla de resultados escrita

¿Desea trabajar con otro aguacero? - (S/N)? N <←>

Si desea ver estos resultados tabulados pulse <1>? 1 <←>

Pantalla de resultados tabulados

Impr
Pant

 <←>

¿Desea realizar más cálculos con la sistematización establecida? - (S/N)? S <←>

Pantalla de opciones de lluvia

Opción? 3 <←>

Enero

P. mensual ? 67,9 <←>

P. máx. diaria ? 23 <←>

Días de lluvia ? 6 <←>

Febrero

P. mensual ? 64 <←>

P. máx. diaria ? 35 <←>
Días de lluvia ? 6 <←>
Marzo
P. mensual ? 89.8 <←>
P. máx. diaria ? 39 <←>
Días de lluvia ? 5 <←>
Abril
P. mensual ? 13.7 <←>
P. máx. diaria ? 11 <←>
Días de lluvia ? 3 <←>
Mayo
P. mensual ? 11.5 <←>
P. máx. diaria ? 4.8 <←>
Días de lluvia ? 5 <←>
Junio
P. mensual ? 14.7 <←>
P. máx. diaria ? 12 <←>
Días de lluvia ? 4 <←>
Julio
P. mensual ? 18.5 <←>
P. máx. diaria ? 12 <←>
Días de lluvia ? 4 <←>
Agosto
P. mensual ? 30.5 <←>
P. máx. diaria ? 28 <←>
Días de lluvia ? 3 <←>
Septiembre
P. mensual ? 68.9 <←>
P. máx. diaria ? 62.2 <←>
Días de lluvia ? 4 <←>
Octubre
P. mensual ? 115.5 <←>
P. máx. diaria ? 95 <←>
Días de lluvia ? 4 <←>
Noviembre
P. mensual ? 46.6 <←>
P. máx. diaria ? 19 <←>
Días de lluvia ? 8 <←>

Diciembre

P. mensual ? 87.1 <←>

P. máx. diaria ? 15.5 <←>

Días de lluvia ? 11 <←>

¿Desea corregir algún dato? - (S/N)? N <←>

Pantalla con los datos anuales correctos

Impr
Pant

 <←>

Pantalla con las precipitaciones virtuales

Impr
Pant

 <←>

Pantalla de resultados tabulados

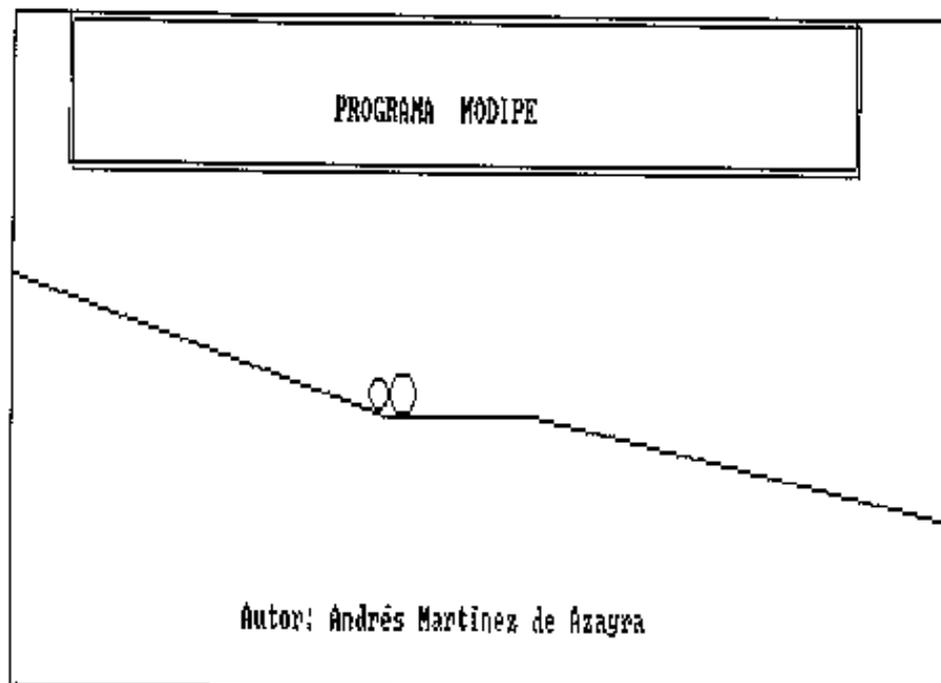
Impr
Pant

 <←>

¿Desea realizar más cálculos con la sistematización establecida? - (S/N)? N <←>

Fin de la ejecución del programa. Regresamos a la línea de comandos del MS-DOS.

En las páginas siguientes incluimos los resultados que ofrece el programa MODIPE para este ejemplo, sacados por impresora mediante volcados de pantalla.



Programa MODIPE

Número de curva de la ladera actual en condición II = ? 80

Área de impluvio (en m²) = 8

Área de recepción (en m²) = 2

¿Área de impluvio formada por más de un complejo hidrológico? - (S/N)? N

Número de curva del área de impluvio en condición II = 80

Número de curva del área de recepción en condición II = 70

Si desea un análisis comparado de los números de curva de la ladera pulse <1> ■

PROGRAMA MODIPE
Relación entre los números de curva

NAC = NI	/		Ladera actual y área de impluvio presentan la misma escorrentia
NAC > NR	/		Ladera actual tiene un umbral de escorrentia MENOR que el área de recepción
NAC > N	/		Ladera actual tiene un umbral de escorrentia MENOR que la unidad sistematizada
NI > NR	/		Área de impluvio con MENOR capacidad de infiltración que el área de recepción [1]
SITUACION FAVORABLE PARA LA ECONOMIA DEL AGUA			

NAC = Número de curva de la ladera actual
 NI = Número de curva del área de impluvio
 NR = Número de curva del área de recepción
 N = Número de curva promedio de la unidad sistematizada

PROGRAMA MODIPE
DATOS DE LA SISTEMATIZACIÓN DEL TERRENO

	S en m ²	NI	P0(1) en mm	N2	P0(2) en mm	N3	P0(3) en mm
LADERA ACTUAL	----	63	30	80	13	90	6
AREA DE IMPLUVIO	8	63	30	80	13	90	6
AREA DE RECEPCION	2	49	52	70	22	84	9
UNIDAD SISTEMATIZADA	10	39	80	52	47	63	30

S = superficie
 NI = número de curva [en condición de humedad i]
 P0(i) = umbral de escorrentia [en condición de humedad i]

CAPACIDAD DE ENBALSE DEL AREA DE RECEPCION: 100 l

PROGRAMA MODIPE

OPCION 1: AGUACERO AISLADO
OPCION 2: SERIE DE AGUACEROS
OPCION 3: AÑO

INDIQUE EL NUMERO DE LA OPCION
QUE DESEA Y PULSE ENTER

? 1

PROGRAMA MODIPE

Precipitación aguacero
58 mm

Condición previa de
humedad:
1

Disponibilidades hídricas (en mm)

en terreno llano	58.0
en la ladera actual	47.7
en la ladera sistematizada ...	58.0
en el area de recepción	59.1

CAPACIDAD MINIMA DE EMBALSE PARA RECOGER TODA LA ESC. SUP.: 14.1734 1

PROGRAMA MODIPE

Precipitación total (en mm): 90
 Número de aguaceros analizado: 3
 originaron escorrentia — en el área de impluvio: 2
 fuera de la unidad : 1

Disponibilidades hídricas (en mm)

en terreno llano	90.0
en la ladera actual	74.8
en la ladera sistematizada ...	89.8
en el area de recepción	149.7

CAPACIDAD MINIMA DE EMBALSE PARA RECOGER TODA LA ESC. SUP.: 102.2561 l

DIGITE LOS VALORES
DEL MES EN CURSO
Y PULSE ENTER

PROGRAMA MODIPE

	P.mes	P.máx	N
1) ENERO	67.9	23	6
2) FEBRERO	64	35	6
3) MARZO	89.8	39	5
4) ABRIL	13.7	11	3
5) MAYO	11.5	4.8	5
6) JUNIO	14.7	12	4
7) JULIO	18.5	12	2
8) AGOSTO	30.5	28	3
9) SEPTIEMBRE	68.9	62.2	4
10) OCTUBRE	115.5	95	4
11) NOVIEMBRE	46.6	19	8
12) DICIEMBRE	87.1	15.5	11

12) DICIEMBRE

¿DESEA CORREGIR ALGUN DATO? - (S/N)? N

PROGRAMA MODIPE

	P.mes	P.máx	N
1) ENERO	67.9	23	6
2) FEBRERO	64	35	6
3) MARZO	89.8	39	5
4) ABRIL	13.7	11	3
5) MAYO	11.5	4.8	5
6) JUNIO	14.7	12	4
7) JULIO	18.5	12	2
8) AGOSTO	30.5	28	3
9) SEPTIEMBRE	68.9	62.2	4
10) OCTUBRE	115.5	95	4
11) NOVIEMBRE	46.6	19	8
12) DICIEMBRE	87.1	15.5	11
Precipitación anual	628.7		
P.máx. diaria considerada		95	
Número de días de lluvia en el año:			61

RESULTADOS PARCIALES

	P. mes	P. máx	N	PV1	N1	PV2	N2	P5	J
1) ENERO	67.9	23.0	6	9.0	1.5	16.0	2.0	20.4	2
2) FEBRERO	64.0	35.0	6	5.8	2.1	20.4	0.8	19.9	2
3) MARZO	89.8	39.0	5	12.7	1.3	25.9	1.3	29.9	3
4) ABRIL	13.7	11.0	3	1.3	0.9	6.2	0.2	4.6	1
5) MAYO	11.5	4.8	5	1.7	1.3	3.2	1.4	3.8	1
6) JUNIO	14.7	12.0	4	0.9	1.4	6.5	0.2	4.9	1
7) JULIO	18.5	12.0	2	6.5	1.0	0.0	0.0	6.2	1
8) AGOSTO	30.5	20.0	3	1.3	1.0	14.6	0.1	10.2	1
9) SEPTIEMBRE	68.9	62.2	4	2.2	1.4	32.2	0.1	23.0	1
10) OCTUBRE	115.5	95.0	4	6.8	1.4	50.9	0.2	38.5	3
11) NOVIEMBRE	46.6	19.0	8	3.9	2.8	11.5	1.5	12.6	2
12) DICIEMBRE	87.1	15.5	11	7.2	2.7	11.3	4.6	18.3	2

Precipitación anual (en l/m²): 628.7
P. max. diaria considerada (en mm): 95
Número de días de lluvia en el año: 61

DISPONIBILIDADES HIDRICAS MENSUALES (en mm)

M E S	LLANO (P. mes)	LADERA ACTUAL	LADERA SISTEMATIZADA	AREA DE RECEPCION
1) ENERO	67.9	66.1	67.9	74.9
2) FEBRERO	64.0	57.5	64.0	89.9
3) MARZO	89.8	58.2	83.1	182.5
4) ABRIL	13.7	13.7	13.7	13.7
5) MAYO	11.5	11.5	11.5	11.5
6) JUNIO	14.7	14.7	14.7	14.7
7) JULIO	18.5	18.5	18.5	18.5
8) AGOSTO	30.5	30.5	30.5	30.5
9) SEPTIEMBRE	68.9	63.3	68.9	91.2
10) OCTUBRE	115.5	40.9	56.4	118.4
11) NOVIEMBRE	46.6	46.0	46.6	48.9
12) DICIEMBRE	87.1	87.0	87.1	87.6
TOTALES	628.7	588.1	562.9	782.3

CAPACIDAD MINIMA DE EMBALSE PARA RECOGER TODA LA ESC. SUP.: 655.6945 1

7.3.9. Comentario sobre los resultados del ejemplo

Se trata de una ladera degradada, con una baja capacidad de acogida de agua debido a sus elevados números de curva. Sus umbrales de escorrentía así lo reflejan: Con que lluevan 13 mm en unas condiciones medias de humedad en la ladera se produce escorrentía. Si llueve sobre mojado (condición tres de humedad), el umbral se reduce hasta 6 mm. Sobre suelo bien seco (condición uno de humedad) la escorrentía superficial comienza con aguaceros superiores a 30 mm. Esta circunstancia propicia una sequedad en la ladera que no es acorde con la pluviometría de Albox. La situación se agrava al considerar que son frecuentes los episodios de lluvia que generan escorrentía. La erosión hídrica consiguiente y la pérdida de los recursos hídricos están conduciendo a un claro fenómeno de desertificación.

Con la sistematización del terreno, el comportamiento hidrológico de la ladera cambia sustancialmente. Los umbrales de escorrentía se elevan. Para la unidad sistematizada pasan a valer: 80 mm en suelo seco, 47 mm en condiciones medias y 30 mm en suelo húmedo. Como consecuencia inmediata tenemos que la ladera va a poder aprovechar mejor ese bien escaso llamado agua. Las posibilidades de incrementar la cobertura vegetal son ahora mayores, especialmente en los lugares donde se acumule el agua, es decir: en las áreas de recepción. Esta cosecha de agua alóctona, procedente de las áreas de impluvio, llega a crear zonas con más disponibilidades hídricas que las indicadas por los pluviómetros.

Para comprobar lo que antecede, hemos simulado el comportamiento de la ladera por medio del programa MODIPE:

En un primer ejemplo concebimos una tormenta de 50 l/m^2 bajo un suelo inicialmente seco (condición de humedad uno). En la ladera actual la tormenta genera escorrentía superficial, lo que se traduce en unas disponibilidades hídricas finales de 47,7 mm. Por contra, con la sistematización se consigue retener todo el volumen de lluvia precipitado (los 50 l/m^2). Dado que el área de impluvio posee el mismo número de curva que el terreno actual (

inalterado), la tormenta genera escorrentía en dicho área. Sin embargo, las labores previstas en el área de recepción (que se sintetizan por una disminución del número de curva y por un microrelieve favorable) permiten retener esa escorrentía. De acuerdo con el programa MODIPE, bastará un microembalse de 14,2 l de capacidad para evitar toda escorrentía fuera de cada unidad sistematizada. Con el alcorque previsto (de 100 l de capacidad) esta exigencia queda ampliamente satisfecha. Así, la disponibilidad hídrica promedio en la ladera coincide con la precipitación caída aunque su distribución sea heterogénea. En el área de impluvio sólo permanecen 47,7 mm (igual que en la ladera actual) mientras que el área de recepción retiene y almacena esa escorrentía lo que se traduce en unas disponibilidades hídricas de 59,1 l/m² (mayores que la lámina de agua caída en la tormenta). La importancia táctica de este hecho a la hora de repoblar la ladera no precisa de más comentarios.

El segundo ejemplo se corresponde con una serie de tres aguaceros consecutivos idénticos (de 30 mm) pero con situaciones previas de humedad del suelo diferentes. El primer episodio de lluvia, al caer sobre la ladera seca (condición <1> de humedad), no provoca escorrentía ni en la ladera actual ni en la ladera sistematizada. Los otros dos aguaceros sí que generan escorrentía superficial tanto en la ladera degradada como en el área de impluvio. La diferencia entre ambos estriba en que en el segundo la escorrentía puede ser almacenada por el área de recepción mientras que en el tercero escurre una pequeña cantidad fuera de la unidad. La capacidad mínima del microembalse debería valer 102,2 l (en vez de los 100 l proyectados) para que no sucediera así. Como balance de los tres episodios de lluvia analizados tenemos que: en terreno llano las disponibilidades hídricas coinciden con la cantidad de agua caída (90 l/m²); en la ladera actual sólo ascienden a 74,8 mm; en la ladera sistematizada a 89,8 l/m² (casi lo mismo que en terreno llano); y en el área de recepción alcanzan la cifra de 149,7 mm (muy superiores a los 90 l/m² de la tormenta merced a la cosecha del agua alóctona procedente del área de impluvio)

Como tercer ejemplo hemos escogido los datos pluviométricos de Albox en el año 1989. Se trata de un año bastante lluvioso lo que nos sirve para poner "a prueba" a la sistematización de nuestro ejemplo: Observamos que el terreno actual es capaz de infiltrar las precipitaciones de los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto y noviembre. En cambio, en los meses restantes se produce escorrentía superficial en la ladera actual, por lo que las disponibilidades hídricas se reducen con respecto a la precipitación caída. La ladera sistematizada mejora su eficacia a la hora de aprovechar el agua de lluvia: enero, febrero, septiembre y diciembre pasan a engrosar el número de meses en los que no se produce escorrentía fuera de la ladera. Tan sólo los meses de marzo y octubre exceden las posibilidades de la sistematización. En dichos meses parte del agua caída escapa pese a los microembalses. Aún así puede decirse que la eficiencia de la sistematización propuesta es bastante elevada en el mes de marzo ($83,1/89,8 = 92,5\%$) mientras que resulta escasa en octubre ($56,4/115,5 = 48,8\%$). La razón hay que buscarla en el fuertísimo aguacero de 95 l/m^2 que excede en mucho la capacidad de la sistematización proyectada. (los alcorques deberían tener un tamaño de $655,7 \text{ l}$ en vez de los 100 previstos). La verdad es que un episodio de lluvia de estas características difícilmente puede ser retenido ni aún en el caso de un bosque climácico. Frente a tales eventos - improbables pero no imposibles - hay que prever la evacuación ordenada de la escorrentía a través de una red de drenaje auxiliar. Pretender retener todo el agua precisaría de pocetas muy grandes, desmedidas y de muy dudosa utilidad.

Observamos que con la sistematización podemos crear en la ladera zonas con un microclima mucho más "pluvioso" que el de la situación actual e - incluso - que el de un terreno llano. En el área de recepción las disponibilidades hídricas superan los datos del pluviómetro en los meses de enero, febrero, marzo, septiembre, octubre, noviembre y diciembre. La trascendencia ecológica de este hecho puede ser aprovechada a la hora de restaurar la ladera. En los primeros momentos y hasta que el repoblado se consolida, esta circunstancia puede resultar de vital importancia para el éxito de la empresa.

Puesto que se trata de un simple ejemplo aclaratorio sobre el funcionamiento y las posibilidades del programa, no debemos extendernos en más consideraciones. Basta con que el manejo y el significado de MODIPE hayan quedado suficientemente claros para que nos demos por satisfechos. El resto del trabajo, es decir: el adecuado manejo de esta herramienta y la correcta interpretación de los resultados del modelo para bien de nuestras inacabables laderas degradadas depende de tí, querido usuario. Y es esta tarea la que verdaderamente tiene importancia. ¡Ojalá aciertes en tus decisiones para bien de nuestro sufrido entorno!

Para futuras revisiones del programa MODIPE y de este manual agradecemos cualquier sugerencia por parte de los usuarios.

ANEXO I
PRECIPITACIONES SINTÉTICAS

1) $i(t) = k$ (constante)

1a) intensidad media máxima para D minutos con un periodo de retorno T (o para un riesgo R durante s años). Esta variable aleatoria puede ajustarse a partir de los datos pluviográficos y tras convenientes análisis estadísticos a la expresión:

$$i(t) = k = \frac{a \cdot T^b}{D^c + d}$$

en donde a, b, c y d son constantes a ajustar para la estación meteorológica en estudio.

A partir del análisis de las series pluviográficas de una estación meteorológica se pueden obtener las curvas de intensidad / duración para distintos periodos de retorno. (Véase p. ej.: Elías Castillo et al (1979).)

Para la España Peninsular, el M.O.P.U. ha desarrollado una metodología general que permite hallar $i(t)$ directamente a partir de las precipitaciones máximas diarias registradas durante la serie de años disponible y de un factor regional.

La fórmula que resuelve es:

$$i(t) = k = I_d \cdot R^a$$

siendo: I_d la intensidad de lluvia media diaria ($I_d = \frac{P_d}{24}$)

P_d la precipitación máxima diaria (para el periodo de retorno elegido)

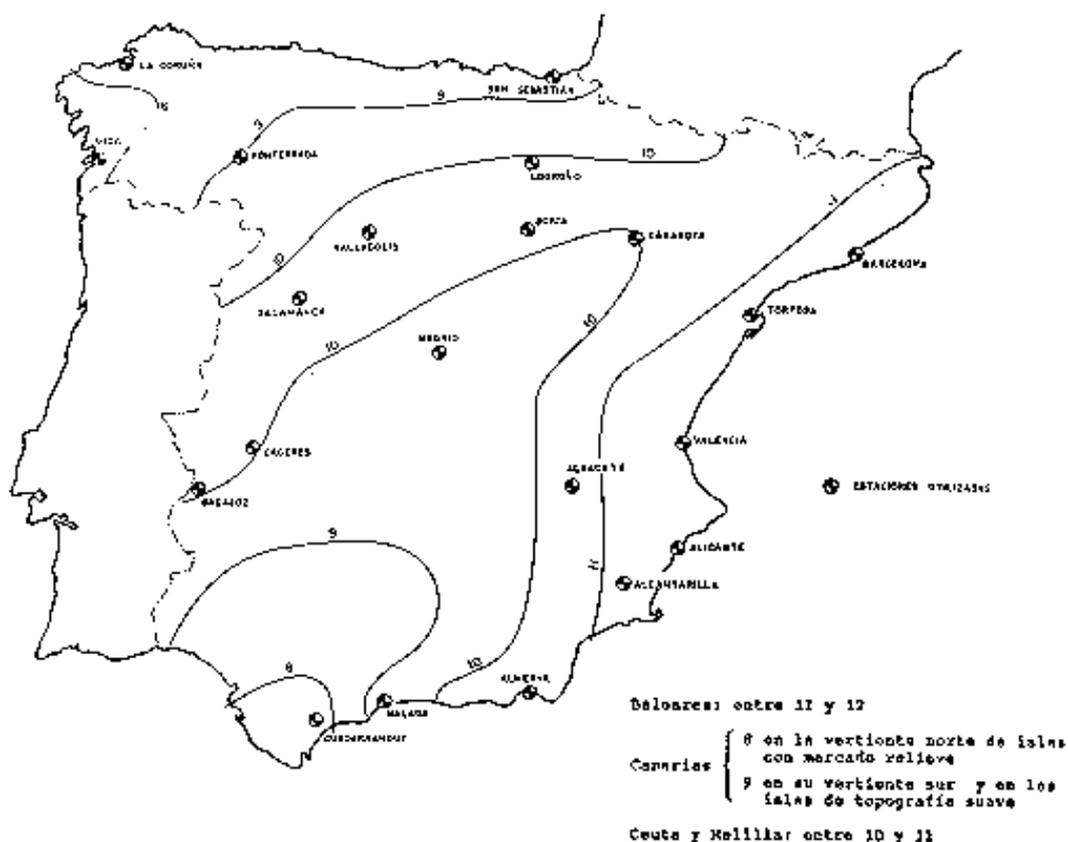
R el factor regional del lugar ($R = \frac{I_1}{I_d}$), relación

entre la intensidad de lluvia horaria (I_1) y la diaria (I_d). Este factor oscila entre 7 y 12 en España. Como primera orientación puede usarse el mapa de "iso R " adjunto.

a un exponente que depende de la duración del chubasco;
 en concreto:

$$a = \frac{1,3954549 - D^{0,1}}{0,3954549}$$

en donde D es la duración del aguacero (en horas)
 (Consúltese p. ej.: la monografía del MOPU del año 1987 titulada
 'Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas
 cuencas naturales'.)

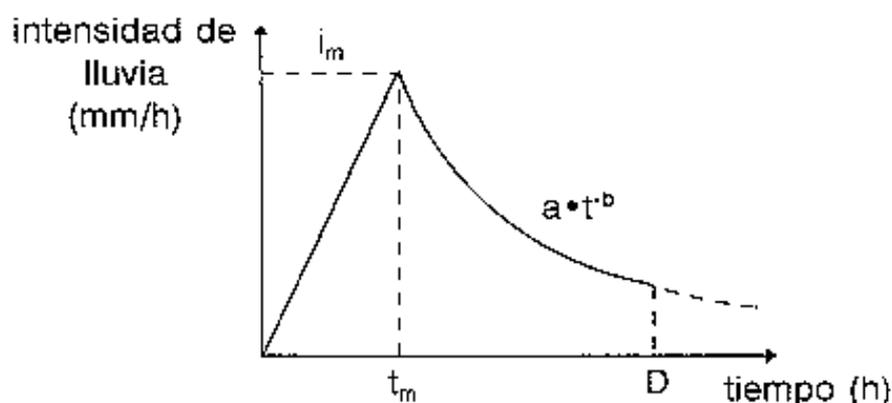


Mapa de "isoR"

1b) Si no se conoce la distribución temporal del aguacero pero se conoce su duración y la cantidad caída una suposición lógica y sencilla consiste en admitir que $i(t) = k = \frac{P}{D}$.

2) Si se conocen cuatro datos del aguacero, a saber: la precipitación total (P), la duración de la lluvia (D), la intensidad de lluvia máxima (i_m) y el instante en que se produce (t_m), se puede concebir una distribución temporal de intensidades como la que proponen Ben-Asher y Warrick (1987):

$$i(t) = \begin{cases} \frac{i_m}{t_m} \cdot t & \text{para } 0 \leq t \leq t_m \\ a \cdot t^{-b} & \text{para } t_m \leq t \leq D \end{cases}$$



Tormenta sintética de duración D en la que llueven P mm y se produce una intensidad máxima i_m en el instante t_m .

Los valores de a y b se obtienen por métodos iterativos convergentes a partir de estas dos ecuaciones:

$$1- i_m = a \cdot (t_m)^{-b}$$

$$-z- P = 0,5 \cdot t_m \cdot i_m = \int_{t_m}^D a \cdot t^{-b} \cdot dt = \frac{a}{1-b} \cdot (D^{1-b} - t_m^{1-b})$$

Los mismos autores proponen una simplificación que consiste en suponer que: $\frac{P}{D} \approx a \cdot D^{-b}$, con lo que la obtención de los dos parámetros del yetograma sintético resulta inmediata.

3) En Estados Unidos, para generar hidrogramas y obtener caudales punta con un determinado periodo de retorno el USDA propone que se trabaje con una tormenta sintética de seis horas de duración. Esta tormenta se define en función de la precipitación máxima en una y seis horas para un mismo periodo de retorno.

La tormenta queda definida en la siguiente tabla:

intervalo (horas)	precipitación caída (mm)	precipitación acumulada (mm)
0 - 0,5	0,07 · Δ	0,07 · Δ
0,5 - 1	0,08 · Δ	0,15 · Δ
1 - 1,5	0,08 · Δ	0,23 · Δ
1,5 - 2	0,09 · Δ	0,32 · Δ
2 - 2,5	0,09 · Δ	0,41 · Δ
2,5 - 3	0,10 · Δ	0,51 · Δ
3 - 3,5	P ₁ - 10	0,51 · Δ + P ₁ - 10
3,5 - 4	10	0,51 · Δ + P ₁
4 - 4,5	0,18 · Δ	0,69 · Δ + P ₁
4,5 - 5	0,14 · Δ	0,83 · Δ + P ₁
5 - 5,5	0,09 · Δ	0,92 · Δ + P ₁
5,5 - 6	0,08 · Δ	Δ + P ₁ = P ₆

Nota

Antes de concluir este anexo conviene que reflejemos la clara divergencia que existe entre nuestros objetivos y los de la Hidrología Civil.

En efecto: la Hidrología Clásica define hietogramas sintéticos para el cálculo de avenidas, para el diseño de estructuras hidráulicas de desagüe. En cambio, nosotros debemos trabajar con aguaceros y yetogramas que nos permitan cuantificar las disponibilidades hídricas de una ladera, que nos ayuden a diseñar estructuras colectoras de agua. Ello probablemente nos obligue a definir una metodología propia para la obtención de aguaceros de cálculo.

ANEXO II
MODELO DE HORTON

El modelo empírico de Horton establece que la capacidad de infiltración de un suelo decrece con el transcurso del tiempo según una ley exponencial que tiende asintóticamente hacia un valor final (f_c) desde un valor inicial (f_0) al comienzo del proceso. La fórmula propuesta (Horton, 1940) es la siguiente:

$$f = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot t}$$

en donde: f es la capacidad de infiltración en el instante t
 f_0 es la capacidad de infiltración inicial
 f_c es la capacidad de infiltración final (para $t \rightarrow \infty$;
en la práctica para $t > 5$ horas)
 α es el exponente de decrecimiento

Para conocer el volumen de agua infiltrado (F) desde el comienzo del proceso hasta un instante cualquiera (t), basta con integrar la ecuación anterior teniendo en cuenta que para $t = 0 \leftrightarrow F = 0$. Así resulta:

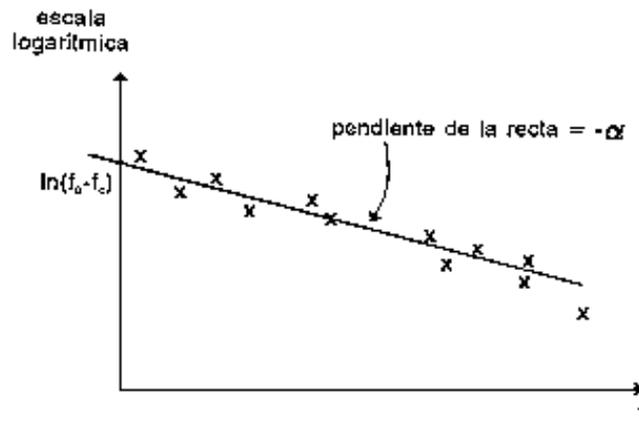
$$F = f_c \cdot t + \frac{1}{\alpha} \cdot (f_0 - f_c) \cdot [1 - e^{-\alpha \cdot t}]$$

El modelo de Horton es sencillo y se ajusta bastante bien a datos experimentales. Los tres parámetros del modelo pueden estimarse por distintos procedimientos:

1) Al tomar logaritmos en la fórmula nos queda:

$$\ln (f - f_c) = -\alpha \cdot t + \ln (f_0 - f_c) \quad [\leftrightarrow y = a \cdot x + b]$$

Esta expresión representa una línea recta en un papel semilogarítmico que tiene una pendiente de ' $-\alpha$ ' y que corta al eje de ordenadas (para $t = 0$) en el punto ' $\ln (f_0 - f_c)$ '. Siempre que el ensayo de campo se haya prolongado suficientemente, el valor de f_c se obtiene directamente de las medidas efectuadas (f_c = valor final medido) con lo que el tercer parámetro (f_0) es de obtención inmediata analizando el punto de corte de la recta con el eje de ordenadas.



2) El método de los mínimos cuadrados puede ser usado para estimar los parámetros de la ecuación empírica de Horton. La expresión que define el volumen total de agua infiltrado puede escribirse de la forma siguiente:

$$F = a_0 + a_1 \cdot t - a_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t}$$

siendo: $a_0 = \frac{1}{\alpha} \cdot (f_0 - f_c)$ y $a_1 = f_c$

Durante los últimos minutos del ensayo de infiltración el término exponencial será despreciable siempre que el experimento se haya prolongado suficientemente ($t > 0,5$ horas). En tal caso:

$$F = a_0 + a_1 \cdot t$$

Los valores de a_0 y a_1 pueden estimarse usando los datos finales del ensayo (p. ej.: las tres medidas finales).

Para determinar el coeficiente α , podemos escribir:

$$-\alpha \cdot t = \ln \frac{F - a_0 - a_1 \cdot t}{-a_0}$$

Si aplicamos un análisis de regresión lineal para los datos restantes del ensayo, excluyendo aquéllos en que:

$$F < a_0 + a_1 \cdot t$$

podremos obtener α .

Al intervalo de tiempo que transcurre entre el comienzo del aguacero y el momento en el que aparecen los primeros charcos se le llama tiempo de encharcamiento.

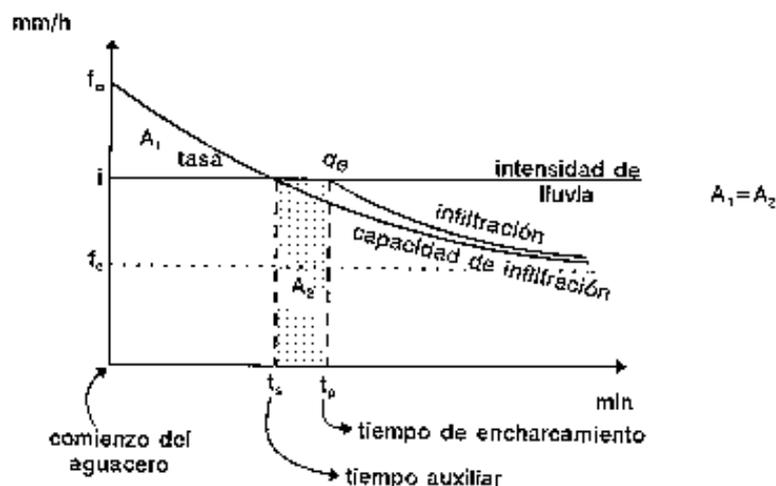
La confrontación del yetograma con la curva de capacidad de infiltración del suelo permite hallar el tiempo de encharcamiento. Para un aguacero sencillo de intensidad constante que caiga sobre un terreno que se ajuste al modelo de Horton, el tiempo de encharcamiento (es decir: el instante en el que se inicia la lluvia neta) se alcanza con posterioridad al momento en el que la capacidad de infiltración coincide con la intensidad de lluvia [t_s en la figura].

La razón estriba en que el volumen de agua infiltrado hasta ese instante es inferior al volumen máximo que podría haberse infiltrado en dicho lapso de tiempo:

$$\int_0^{t_s} i(t) \cdot dt < \int_0^{t_s} [f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot t}] \cdot dt$$

El volumen de agua que no ha tenido que infiltrar el suelo al principio del chubasco [por ser este poco intenso] sirve de remanente para retrasar el tiempo de encharcamiento hasta t_p . Este instante se obtiene imponiendo que el ahorro en el volumen de agua infiltrado al comienzo respecto del máximo posible se iguale con el volumen de agua que se infiltra desde t_s hasta t_p , momento en el que se inicia la lluvia neta. Al respecto pueden consultarse los trabajos de Chu (1978), Mls (1980), Rutílek (1980) y Verma (1982).

De acuerdo con la figura: $A_1 = A_2$.



$$A1 = \int_0^{t_s} [f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot t}] \cdot dt - \int_0^{t_s} i(t) \cdot dt$$

$$A2 = \int_{t_s}^{t_p} i(t) \cdot dt$$

Al operar se llega a que:

$$t_p = \frac{1}{\alpha \cdot k} \cdot \left[f_0 - k + f_c \cdot \ln \left(\frac{f_0 - f_c}{k - f_c} \right) \right] \quad [14]$$

Por otro lado, el tiempo auxiliar t_s se obtiene de manera inmediata al imponer que:

$$i(t) = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot t}$$

Se llega a la ecuación:

$$t_s = - \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left(\frac{k - f_c}{f_0 - f_c} \right) \quad [17]$$

La tasa de infiltración una vez superado el tiempo de encharcamiento sigue una ley exponencial decreciente similar a la capacidad de infiltración inicial. En realidad es la misma ecuación pero con un desplazamiento de tiempos (Δt) motivado por la no coincidencia de t_s y t_p .

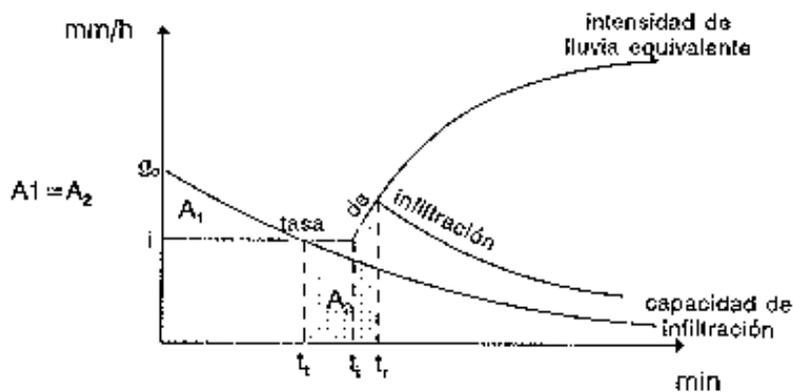
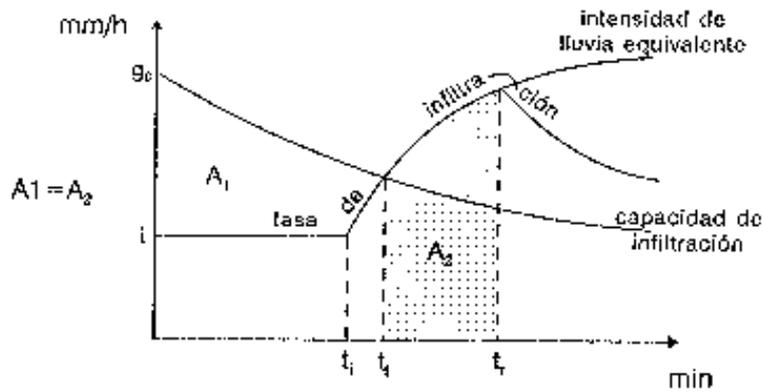
$$\Delta t = t_p - t_s \quad [16]$$

$$v_i(t) = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot (t - \Delta t)} \quad [15]$$

De forma análoga, es decir imponiendo que $A_1 = A_2$, se puede obtener el tiempo de encharcamiento en el área de recepción si está recibiendo escorrentía del área de impluvio además de la lluvia (de intensidad constante, k) que incide directamente sobre ella. La intensidad de lluvia equivalente vale en tal caso:

$$i(t) = k + \left[k - f_c - (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot (t - \Delta t)} \right] \cdot \frac{S_1}{S_2} \quad [20]$$

Las dos figuras que insertamos a continuación contemplan los casos posibles que cabe concebir al respecto.



Para el primero de los casos ($t_t > t_i$), las ecuaciones que resuelven son:

-a- Obtención de t_t

$$g_c + (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot t_t} = k + \left[k - f_c - (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot (t - \Delta t)} \right] \cdot \frac{S_1}{S_2} \quad [22]$$

-b- Obtención de t_z

$$A1 = A2 \quad [\longleftrightarrow \text{ ec. 21}]$$

$$A1 = \int_0^{t_i} \left[g_c + (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot t_t} - k \right] \cdot dt +$$

$$+ \int_{t_i}^{t_t} \left[g_c + (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot t_t} - k - \left[k - f_c - (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot (t - \Delta t)} \right] \cdot \frac{S_1}{S_2} \right] \cdot dt$$

$$A2 = \int_{t_t}^{t_z} \left[k + \left[k - f_c - (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot (t - \Delta t)} \right] \cdot \frac{S_1}{S_2} \right] \cdot dt$$

Para el segundo de los casos ($t_t < t_i$), las ecuaciones que resuelven son:

-a- Obtención de t_t

$$t_t = - \frac{1}{\beta} \cdot \ln \left(\frac{k - g_c}{g_0 - g_c} \right) \quad [24]$$

-b- Obtención de t_z

$$A1 = \int_0^{t_t} \left[g_c + (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot t_t} - k \right] \cdot dt = A2 \quad [\longleftrightarrow \text{ ec. 23}]$$

$$A2 = \int_{t_t}^{t_i} k \cdot dt + \int_{t_i}^{t_r} \left[k + \left[k - f_c - (f_0 - f_c) \cdot e^{-\alpha \cdot (t-\Delta t)} \right] \cdot \frac{S_1}{S_2} \right] \cdot dt$$

Una vez hallado el tiempo de encharcamiento del área de recepción (t_r) y su tiempo auxiliar (t_t), podemos escribir la ecuación que calcula la velocidad de infiltración en el área receptora

$$v_i(t) = \begin{cases} k & \text{si } t \leq t_r \\ g_c + (g_0 - g_c) \cdot e^{-\beta \cdot (t-\Delta t)} & \text{si } t > t_r \end{cases} \quad [25]$$

siendo: $\Delta t = t_r - t_t$ [26]

ANEXO III

Obtención de la primitiva de $f(x) = \frac{1}{a + b \cdot x^{1,5}}$

$$dF(x) = f(x) \cdot dx = \frac{1}{a + b \cdot x^{1,5}} \cdot dx$$

$$F(x) = \int \frac{1}{a + b \cdot x^{1,5}} \cdot dx$$

Hacemos el siguiente cambio de variable: $t^2 = x$

$$2 \cdot t \cdot dt = dx$$

Nos queda:

$$F(t^2) = \int \frac{2 \cdot t \cdot dt}{a + b \cdot t^3} = \frac{2}{b} \cdot \int \frac{t \cdot dt}{\frac{a}{b} + t^3}$$

Por Ruffini podemos escribir:

$$\frac{a}{b} + t^3 = \left(t + \sqrt[3]{\frac{a}{b}} \right) \cdot \left[t^2 - \sqrt[3]{\frac{a}{b}} \cdot t + \left(\sqrt[3]{\frac{a}{b}} \right)^2 \right]$$

Llamamos $k = \sqrt[3]{\frac{a}{b}}$. Entonces:

$$\frac{t}{\frac{a}{b} + t^3} = \frac{A}{t+k} + \frac{M \cdot t + N}{t^2 - k \cdot t + k^2} = \frac{A \cdot (t^2 - k \cdot t + k^2) + (M \cdot t + N) \cdot (t+k)}{\frac{a}{b} + t^3}$$

$$\frac{t}{\frac{a}{b} + t^3} = \frac{t^2 \cdot (A + M) + t \cdot (-k \cdot A + M \cdot k + N) + A \cdot k^2 + N \cdot k}{\frac{a}{b} + t^3}$$

Igualando coeficientes:

$$0 = A + M$$

$$1 = -k \cdot A + M \cdot k + N$$

$$0 = A \cdot k^2 + N \cdot k$$

$$\text{Resolviendo: } A = -\frac{1}{3 \cdot k} \quad ; \quad M = \frac{1}{3 \cdot k} \quad ; \quad N = \frac{1}{3}$$

Podemos escribir:

$$F(t^2) = \frac{2}{b} \cdot \left[\int \frac{-\frac{1}{3 \cdot k}}{t+k} \cdot dt + \int \frac{\frac{1}{3 \cdot k} \cdot t + \frac{1}{3}}{t^2 - k \cdot t + k^2} \cdot dt \right]$$

$$F(t^2) = \frac{2}{b} \cdot \left[-\frac{1}{3 \cdot k} \cdot \ln(t+k) + \int \frac{\frac{t}{3 \cdot k} + \frac{1}{3}}{(t - \frac{1}{2} \cdot k)^2 + \frac{3}{4} \cdot k^2} \cdot dt \right]$$

$$F(t^2) = -\frac{2}{3 \cdot k \cdot b} \cdot \ln(t+k) + \frac{2}{b} \cdot I_1$$

Resolvemos la integral I_1 :

$$I_1 = \int \frac{\frac{t}{3 \cdot k} + \frac{1}{3}}{(t - \frac{1}{2} \cdot k)^2 + \frac{3}{4} \cdot k^2} \cdot dt = \int \frac{\frac{1}{3 \cdot k} \cdot t - \frac{1}{3 \cdot k} \cdot \frac{1}{2} \cdot k + \frac{1}{3 \cdot k} \cdot \frac{1}{2} \cdot k + \frac{1}{3}}{(t - \frac{1}{2} \cdot k)^2 + \frac{3}{4} \cdot k^2} \cdot dt$$

$$I_1 = \frac{1}{3 \cdot k} \cdot \frac{1}{2} \int \frac{2 \cdot (t - 0,5 \cdot k)}{(t - \frac{1}{2} \cdot k)^2 + \frac{3}{4} \cdot k^2} \cdot dt + \frac{1}{2} \int \frac{1}{(t - \frac{1}{2} \cdot k)^2 + \frac{3}{4} \cdot k^2} \cdot dt$$

$$I_1 = \frac{1}{6 \cdot k} \cdot \ln(t^2 - k \cdot t + k^2) + \frac{1}{2} \int \frac{dt}{(t - \frac{1}{2} \cdot k)^2 + \frac{3}{4} \cdot k^2}$$

$$I_1 = \frac{1}{6 \cdot k} \cdot \ln(t^2 - k \cdot t + k^2) + \frac{1}{k \cdot \sqrt{3}} \cdot \operatorname{arctg} \left[\frac{2 \cdot (t - 0,5 \cdot k)}{\sqrt{3} \cdot k} \right]$$

Si sustituimos en la ecuación

$$F(t^2) = -\frac{2}{3 \cdot k \cdot b} \cdot \ln(t+k) + \frac{2}{b} \cdot I_1$$

nos queda:

$$F(t^2) = -\frac{2}{3 \cdot k \cdot b} \cdot \ln(t+k) + \frac{2}{b} \cdot \left[\frac{1}{6 \cdot k} \cdot \ln(t^2 - k \cdot t + k^2) + \frac{1}{k \cdot \sqrt{3}} \cdot \operatorname{arctg} \left[\frac{2 \cdot (t - 0,5 \cdot k)}{\sqrt{3} \cdot k} \right] \right]$$

$$F(t^2) = -\frac{2}{3 \cdot k \cdot b} \cdot \ln(t+k) + \frac{1}{3 \cdot k \cdot b} \cdot \ln(t^2 - k \cdot t + k^2) + \frac{2}{\sqrt{3} \cdot b \cdot k} \cdot \operatorname{arctg} \left[\frac{2 \cdot (t - 0,5 \cdot k)}{\sqrt{3} \cdot k} \right]$$

Si deshacemos el cambio:

$$F(x) = -\frac{2}{3 \cdot k \cdot h} \cdot \ln(\sqrt{x} + k) + \frac{1}{3 \cdot k \cdot b} \cdot \ln(x - k \cdot \sqrt{x} + k^2) +$$

$$+ \frac{2}{\sqrt{3} \cdot b \cdot k} \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{2 \cdot (\sqrt{x} - 0,5 \cdot k)}{\sqrt{3} \cdot k} \right)$$

siendo $k = \sqrt[3]{\frac{a}{b}}$.

Luego:

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{a + b \cdot x^{1,5}} dx = F(x_2) - F(x_1)$$

Para el caso que se plantea en la fase final con rebosadura:

$$t_{i+1} = - \int_{Y_f - H}^0 \frac{S_2}{f(D+t_i) \cdot S_2 + c \cdot L \cdot h^{1,5}} dh$$

tenemos que:

$$a = f(D+t_i) \cdot S_2$$

$$b = c \cdot L$$

$$t_{i+1} = S_2 \cdot (F(Y_f - H) - F(0))$$

ANEXO IV
METODO DEL NUMERO DE CURVA

1. Introducción

Este modelo sirve para calcular la escorrentía superficial (o lluvia neta) que genera un aguacero en una cuenca de pequeñas dimensiones. Se trata de un método desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (S.C.S. del U.S.D.A.) para cuencas no aforadas en las que se desee estimar los caudales circulantes por métodos hidrometeorológicos.

2) Desarrollo del modelo

A partir de numerosos exámenes del comportamiento de la escorrentía directa con respecto a la precipitación caída en cuencas naturales, se formulan las dos siguientes hipótesis fundamentales del modelo:

1) La escorrentía superficial se inicia una vez alcanzado un cierto umbral de escorrentía (P_o)

2) El cociente entre retención de agua real y retención máxima es igual al cociente entre escorrentía directa y escorrentía superficial máxima.

$$\frac{\text{retención real de agua}}{\text{retención máxima}} = \frac{\text{escorrentía superficial}}{\text{escorrentía superficial máxima}}$$

- R_r = Retención real de agua = lo que no escurre de la precipitación caída = $P - E_s - P_o$ (en mm) [\approx lo que se infiltra una vez alcanzado el umbral de escorrentía]. Esta ecuación expresa la ecuación de continuidad: $P = Q + P_o + R_r$

- P = precipitación del aguacero (si tiene una duración superior a 24 horas debe ser dividido en precipitaciones diarias; en tal caso hay que variar las condiciones previas de humedad diariamente)

- E_s = escorrentía superficial real (en mm) [= Q]

- P_0 = umbral de escorrentía previa al encharcamiento = altura (en mm) necesaria para que se inicie la escorrentía superficial. P_0 se corresponde con la cantidad inicial de agua retenida por interceptación, embalse superficial, e infiltración antes de iniciarse la escorrentía.

- Retención máxima posible = S = parámetro del modelo que depende del tipo de suelo, de su humedad inicial antes del aguacero, de la vegetación que sustenta y del tratamiento cultural que se realice sobre el suelo. Representa el potencial máximo de retención de agua que tiene el complejo suelo-vegetación analizado.

- Escorrentía superficial real = $E_e = Q$

- Escorrentía superficial máxima = $P - P_0$ = lo que llueve menos el umbral de escorrentía (extracciones iniciales que son inevitables de acuerdo con el modelo).

Si escribimos la segunda hipótesis utilizando los símbolos que hemos empleado, nos queda:

$$\frac{R_e}{S} = \frac{P - Q - P_0}{S} = \frac{Q}{P - P_0}$$

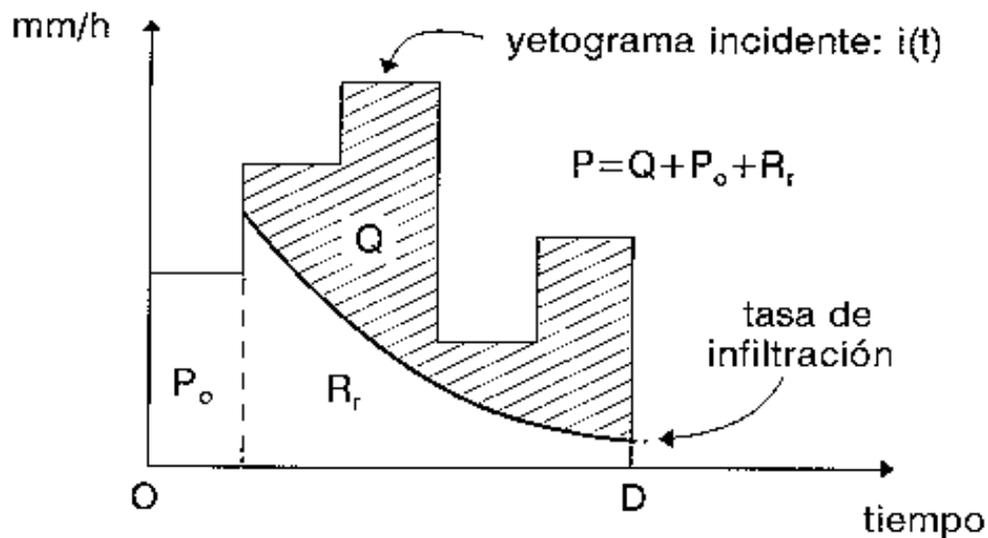
Luego:

$$Q = \frac{[P - P_0]^2}{P - P_0 + S}$$

Siempre se ha de cumplir:

$$Q \leq P - P_0$$

$$R_e \leq S$$



Interpretación física de las variables que considera el modelo

Después de numerosas experiencias, el S.C.S. ha encontrado una ligazón entre P_0 y S. A saber:

$$P_0 = 0,2 \cdot S \quad (S = 5 \cdot P_0)$$

con lo que se llega a la conocida ecuación del método del número de curva:

$Q = \frac{[P - P_0]^2}{P + 4 \cdot P_0} \quad \text{si } P > P_0$
$Q = 0 \text{ mm} \quad \text{si } P \leq P_0$

La ligazón entre P_0 y S puede interpretarse como que el 20% de la retención máxima posible equivale al umbral de escorrentía. El 80% restante se produce por infiltración una vez comenzada la escorrentía y siempre que el aguacero sea "suficientemente largo".
 [¡Conviene tener presente que el ajuste del modelo se ha hecho

con datos de precipitaciones diarias!]

3) Aplicación práctica del método

El parámetro P_0 (o S) se deduce a partir de unas tablas. En estas tablas se ofrece un número adimensional (N) que se denomina número de curva y que puede tomar valores comprendidos entre cero y cien:

$N = 0$ si la cuenca o terreno es tan permeable que no escurre agua ante ningún chubasco (situación extrema, imposible en la práctica)

$N = 100$ si la cuenca es totalmente impermeable (escurre todo lo que llueve, por ejemplo: superficies de agua, tejados o carreteras asfaltadas se aproximan mucho a esta situación)

A mayor N mayor escorrentía superficial cabe esperar ante un mismo aguacero.

La ligazón que existe entre P_0 (o S) y N es la siguiente:

$$S = \frac{25.400 - 254 \cdot N}{N} \quad (\text{ en mm })$$

$$P_0 = 0,2 \cdot \frac{25.400 - 254 \cdot N}{N} \quad (\text{ en mm })$$

Para el caso de cuencas (o terrenos) heterogéneos hay que efectuar una ponderación para obtener el número de curva correspondiente a la cuenca en conjunto. Para ello se divide la cuenca en complejos hidrológicos (superficies con características hidrológicas homogéneas) y se asigna a cada una de estas superficies (S_i) el número hidrológico (N_i) más apropiado.

El número de curva promedio de la cuenca (N) vale:

$$N = \frac{\sum N_i \cdot S_i}{S}$$

siendo:

S_i la superficie de la cuenca a la que corresponde un número hidrológico N_i .

$$S = \sum S_i = \text{superficie total de la cuenca}$$

La ponderación hay que realizarla a nivel de números hidrológicos.

El número de curva de una zona depende del tipo de cubierta vegetal, del tratamiento o explotación del terreno, de sus condiciones hidrológicas, del tipo de suelo, y del grado de humedad del terreno al comienzo del aguacero a analizar. Todos estos parámetros se contemplan en las tablas que ha desarrollado el Servicio de Conservación de Suelos americano y que se ofrecen al final de este tema.

a) Tipo de cubierta vegetal: las tablas distinguen entre diferentes cultivos agrícolas (herbáceos, leñosos o mixtos), prados de siega, pastizales aprovechados a diente, montes adhesados, bosques,....

b) Tratamiento o explotación del terreno y prácticas de conservación: cultivos según hileras rectas, según curvas de nivel o en terrazas; también se contempla en este apartado la presencia o no de residuos vegetales a modo de 'mulch'.

c) Tipo de suelo

En este sentido, el USDA clasifica los suelos en cuatro grupos:

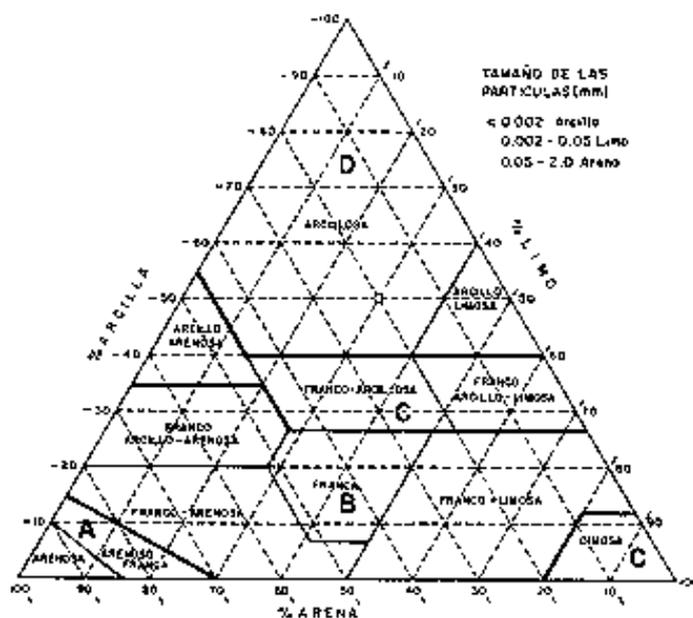
- grupo A: suelos profundos y de texturas gruesas (arenosos o areno-limosos). En ellos el agua se infiltra rápidamente aún cuando estén muy húmedos. Su potencial de escurrimiento es mínimo por su gran permeabilidad. Elevada capacidad de infiltración.

- grupo B: suelos francos y profundos, suelos franco-arenosos de mediana profundidad, y suelos arenosos de escaso espesor. Presentan una moderada permeabilidad cuando están saturados.

- grupo C: suelos franco-arcillosos e incluso arcillosos con escasa capacidad de infiltración una vez saturados; también se incluyen aquí suelos que presenten horizontes someros bastante impermeables. Los suelos de este grupo poseen un bajo contenido en materia orgánica.

- grupo D: suelos muy arcillosos y profundos con alto grado de tumefacción; también se incluyen aquí los terrenos que presentan una capa de arcilla somera y muy impermeable así como suelos jóvenes de escaso espesor sobre una roca madre impermeable, ciertos suelos salinos y suelos con el nivel freático muy alto.

A partir de la textura de un suelo (por ejemplo haciendo uso de la clasificación textural del S.C.S.) y de su espesor se puede saber al grupo al que pertenece. En este sentido, el M.O.P.U sugiere la siguiente correspondencia (orientativa) entre textura y tipo de suelo:



Otro parámetro que permite clasificar un suelo de acuerdo con los grupos que establece el método del número de curva, es su capacidad de infiltración final

Grupo	Mínima tasa de infiltración ($\approx f_c$, según el modelo de Horton)
A	7,62 - 11,43 mm/h
B	3,81 - 7,62 mm/h
C	1,27 - 3,81 mm/h
D	0 - 1,27 mm/h

d) Condición de humedad inicial del suelo (justo antes del aguacero): El modelo de los números hidrológicos distingue tres situaciones de humedad diferentes;

- Condición II : suelo en condición de humedad media (alejado de la capacidad de campo y del punto de marchitez permanente). Los números de curva dados en las tablas (véase al final de este tema) se refieren a esta situación.

La ponderación según superficies indicada en un apartado anterior se debe realizar siempre para esta condición de humedad.

- Condición I : suelo muy seco (pero sin llegar al índice de marchitez). Situación ideal para realizar labores agrícolas.

- Condición III: suelo muy húmedo, saturado o próximo a la saturación; también aplicable a suelos algo húmedos pero helados.

Estas condiciones de humedad vienen definidas por consideraciones estadísticas ('en el 10% de las ocasiones suelo más húmedo' define la condición III; 'en el 50% de las ocasiones suelo más húmedo' define la condición II; 'en el 10% de las ocasiones suelo más seco' define la condición I de humedad)

La tabla siguiente permite pasar de una condición de humedad a otra.

Cond. II N(II)	Cond. I N(I)	Cond. III N(III)
100	100	100
99	97	100
98	94	99
97	91	99
96	89	99
95	87	98
94	85	98
93	83	98
92	81	97
91	80	97
90	78	96
89	76	96
88	75	95
87	73	95
86	72	94
85	70	94
84	68	93
83	67	93
82	66	92
81	64	92
80	63	91
79	62	91
78	60	90
77	59	89
76	58	89
75	57	88
74	55	88
73	54	87
72	53	86
71	52	86
70	51	85
69	50	84
68	48	84
67	47	83
66	46	82
65	45	82
64	44	81
63	43	80
62	42	79
61	41	78
60	40	78

Cond. II N(II)	Cond. I N(I)	Cond. III N(III)
59	39	77
58	38	76
57	37	75
56	36	75
55	35	74
54	34	73
53	33	72
52	32	71
51	31	70
50	31	70
49	30	69
48	29	68
47	28	67
46	27	66
45	26	65
44	25	64
43	25	63
42	24	62
41	23	61
40	22	60
39	21	59
38	21	58
37	20	57
36	19	56
35	18	55
34	18	54
33	17	53
32	16	52
31	16	51
30	15	50
25	12	43
20	9	37
15	6	30
10	4	22
5	2	13
0	0	0

Este cambio, desde la condición II a las otras dos situaciones de humedad, también puede realizarse mediante estas ecuaciones:

$$N(I) = \frac{4,2 \cdot N(II)}{10 - 0,058 \cdot N(II)}$$

$$N(III) = \frac{23 \cdot N(II)}{10 + 0,13 \cdot N(II)}$$

siendo N(I), N(II) y N(III) los números de curva en condición I,

II y III (respectivamente) que se corresponden entre sí.

La determinación de las condiciones iniciales de humedad se realiza en función de la precipitación acumulada los cinco días previos al aguacero (120 horas antes). A su vez se distingue entre el periodo vegetativo y el de reposo. Vale la tabla siguiente:

condición	lluvia total caída durante los cinco días anteriores	
	reposo vegetativo	periodo vegetativo
I	menos de 12,5 mm	menos de 35,5 mm
II	de 12,5 a 28 mm	de 35,5 a 53 mm
III	más de 28 mm	más de 53 mm

TABLA GENERAL PARA LA DETERMINACION DEL NUMERO DE CURVA
 (condición II de humedad y $P_0 = 0,2 S$)

Tipo de vegetación	Laboreo	Condición hidrológica	Tipo de suelo			
			A	B	C	D
Barbecho	desnudo	---	77	86	91	94
	CR	pobre	76	85	90	93
	CR	buena	74	83	88	90
Cultivos alineados	R	pobre	72	81	88	91
	R	buena	67	78	85	89
	R + CR	pobre	71	80	87	90
	R + CR	buena	64	75	82	85
	C	pobre	70	79	84	88
	C	buena	65	75	82	86
	C + CR	pobre	69	78	83	87
	C + CR	buena	64	74	81	85
	C + T	pobre	66	74	80	82
	C + T	buena	62	71	78	81
	C + T + CR	pobre	65	73	79	81
	C + T + CR	buena	61	70	77	80
	Cultivos no alineados, o con surcos pequeños o mal definidos	R	pobre	65	76	84
R		buena	63	75	83	87
R + CR		pobre	64	75	83	86
R + CR		buena	60	72	80	84
C		pobre	63	74	82	85
C		buena	61	73	81	84
C + CR		pobre	62	73	81	84
C + CR		buena	60	72	80	83
C + T		pobre	61	72	79	82
C + T		buena	59	70	78	81
C + T + CR		pobre	60	71	78	81
C + T + CR		buena	58	69	77	80
Cultivos densos de leguminosas o prados en alternancia		R	pobre	66	77	85
	R	buena	58	72	81	85

TABLA GENERAL PARA LA DETERMINACION DEL NUMERO DE CURVA
(condición II de humedad y $P_0 = 0,2 \cdot S$)

Tipo de vegetación	Laboreo	Condición hidrológica	Tipo de suelo			
			A	B	C	D
Cultivos densos de leguminosas o prados en alternancia	C	pobre	64	75	83	85
	C	buenas	55	69	78	83
	C + T	pobre	63	73	80	83
	C + T	buenas	51	67	76	80
Pastizales o pastos naturales	pobres		68	79	86	89
	regulares		49	69	79	84
	buenas		39	61	74	80
Pastizales	C	pobres	47	67	81	86
	C	regul.	25	59	75	83
	C	buenas	6	35	70	79
Prados permanentes	---	---	30	58	71	78
Matorral-herbazal, siendo el matorral preponderante	pobres		48	67	77	83
	regulares		35	56	70	77
	buenas		≤30	48	65	73
Combinación de arbolado y herbazal, cultivos agrícolas leñosos	pobres		57	73	82	86
	regulares		43	65	76	82
	buenas		32	58	72	79
Montes con pastos (aprovechamientos silvopastorales)	pobres		45	66	77	83
	regulares		36	60	73	79
	buenas		25	55	70	77
Bosques	I muy pobres		56	75	86	91
	II pobres		46	68	78	84
	III regulares		36	60	70	76
	IV buenas		26	52	63	69
	V muy buenas		15	44	54	61
Caseríos	---		59	74	82	86
Caminos en tierra	---		72	82	87	89
Caminos con firme	---		74	84	90	92

NOTAS

a) Significado de los términos de la tabla

Pastizales o pastos naturales: Se clasifican en tres grupos teniendo en cuenta consideraciones hidrológicas y no la producción de forraje.

Se consideran pobres los que soportan una alta carga ganadera por lo que tienen escasa materia orgánica sobre el terreno; también si las plantas cubren menos del 50% de la superficie total. Regulares, aquéllos cuya cubierta vegetal alcanza entre un 50% y un 75% de la superficie del terreno y son moderadamente pastados. Buenos, los que su cubierta vegetal supera el 75% de la superficie del terreno y son ligeramente pastados.

Prados permanentes: No son pastados, es decir: su vegetación es permanente cubriendo el 100% de la superficie del terreno; son prados de siega para henificar.

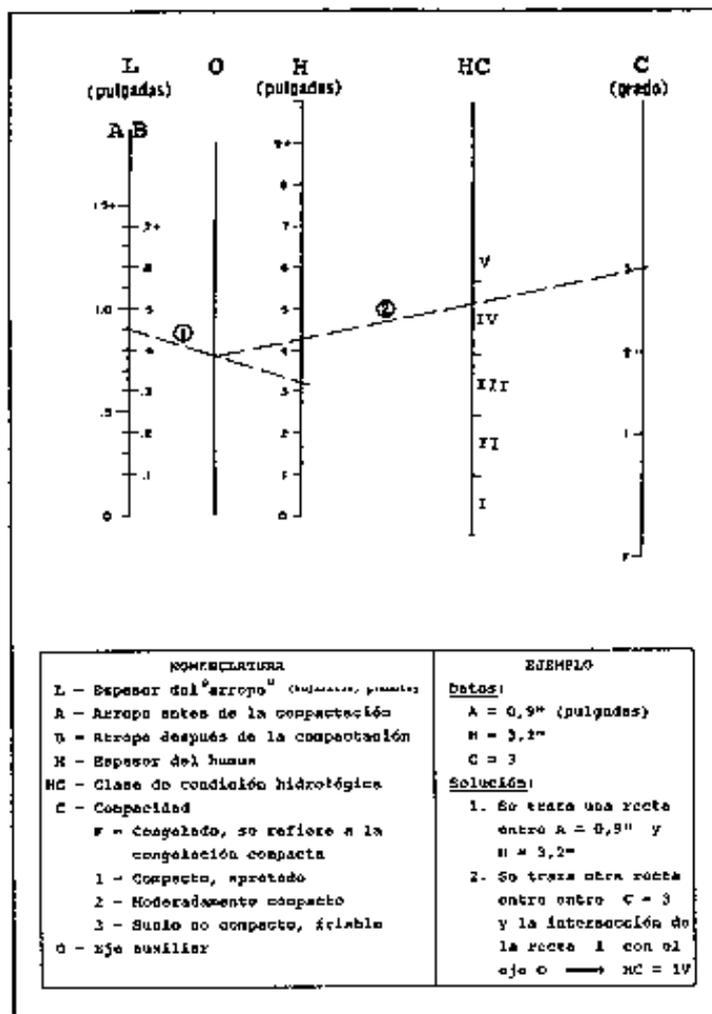
Matorral - herbazal, siendo el matorral preponderante: Se distingue entre pobre (si la cubierta del suelo es inferior al 50%), regular (50% - 75% de cubierta vegetal), y buena (si hay una cubierta vegetal superior al 75%)

Combinación de arbolado y herbazal: Los números de curva que se indican se refieren a un 50% de cubierta proporcionada por el arbolado y un 50% por el herbazal. Para otros porcentajes hay que ponderar entre los valores que se ofrecen en los epígrafes de 'pastizales' y 'montes con pastos'.

Montes con pastos: Se establecen también tres clases basadas en factores hidrológicos y no de producción. Se consideran pobres cuando se dan labores al terreno o cuando son abundantemente pastados e incluso quemados, de modo que el monte está sin arbustos, matas, pastos y restos vegetales. Se consideran regulares cuando son pastados pero nunca labrados o quemados, de manera que la superficie del terreno presenta pastos y mantillo. Por último, son buenos aquéllos en que , protegidos del pastoreo, el terreno aparece cubierto de matas, abundantes pastos naturales y restos orgánicos de toda clase.

Bosques: Las cinco clases hidrológicas establecidas se basan en la consideración de la profundidad y grado de consolidación de

las capas de mantillo y de humus del bosque, de modo que cuanto mayor sea el espesor de dichas capas y menos compactas e impermeables aparezcan tanto mejor será la condición hidrológica resultante para la infiltración.



Nomograma para la determinación de la condición hidrológica de un bosque

b) Significado de las abreviaturas

CR = con cubierta de residuos vegetales que ocupe al menos el 5% de la superficie del suelo durante todo el año

R = si las labores de la tierra (labrar, gradear, sembrar, etc.) se realizan en linea recta, sin considerar la pendiente del terreno.

C = si el cultivo se realiza por curvas de nivel

T = si se trata de terrenos aterrazados (terrazas abiertas con desagüe para la conservación de suelos)

En terrenos de pendiente inferior a un 2% se considera siempre el cultivo según curvas de nivel (pese a que se realice en surcos rectos)

c) La 'condición hidrológica' se basa en una combinación de factores que afectan a la infiltración y a la escorrentía superficial. Estos factores son:

-a- densidad y fracción de cabida cubierta de la vegetación

-b- grado de cubierta vegetal a lo largo del año

-c- número de cultivos de leguminosas y otras pratenses en la rotación

-d- porcentaje de residuos vegetales cubriendo la superficie del suelo (valores superiores al 20% implican una buena condición hidrológica del suelo)

-e- grado de rugosidad superficial

En total: condición hidrológica pobre si los factores antes indicados dificultan la infiltración y facilitan la escorrentía superficial; condición hidrológica buena en la situación contraria.

NUMEROS DE CURVA PARA ZONAS ARIDAS Y SEMIARIDAS DE U.S.A.
(condición II de humedad y $P_0 = 0,2 \cdot S$)

Tipo de vegetación	Condición hidrológica	Tipo de suelo			
		A	B	C	D
Herbazal con algo de matorral [1]	pobre	?	80	87	93
	medio	?	71	81	89
	bueno	?	62	74	85
Oak brush, aspen, mountain mahogany, bitter brush, maple [2]	pobre	?	66	74	79
	medio	?	48	57	63
	bueno	?	30	41	48
Pinyon, juniper, o ambos; con cubierta herbácea [3]	pobre	?	75	85	89
	medio	?	58	73	80
	bueno	?	41	61	71
Sagebrush con cubierta herbácea [4]	pobre	?	67	80	85
	medio	?	51	63	70
	bueno	?	35	47	55
Matorral desértico Palo verde, mesquite, cactus, bursage saltbrush, etc. [5]	pobre	63	77	85	88
	medio	55	72	81	86
	bueno	49	68	79	84

NOTAS

a) Las especies americanas nombradas en la descripción del tipo de vegetación son:

[2] { Oak brush = *Quercus gambelii*
Aspen = *Populus tremuloides* y *Populus fremontii*
Mountain mahogany = *Cercocarpus ledifolius*
Bitter brush = ?
Maple = *Acer grandidentatum*

[3] { Pinyon = *Pinus edulis* y *Pinus monophylla*
Juniper = *Juniperus osteosperma*

4 ↔ Sagebrush = *Artemisia tridentata*

5 {
Saltbrush = *Atriplex reptans*
Greasewood = *Ambrosia dumosa*
Creosotebush = *Larrea tridentata*
Blackbrush = *Coleogyne ramosissima*
Bursage = *Bursera californica*
Palo verde = *Cercidium americanum*
Mesquite = *Prosopis glandulosa*
Cactus = *Carnegiea gigantea; Opuntia spp*

b) El significado de los adjetivos empleados para describir la condición hidrológica es;

pobra: si menos del 30% del suelo está cubierto por hojarasca, hierba o matorral

medio: si hay una cobertura comprendida entre el 30% y el 70%

bueno: si la protección vegetal del suelo es superior al 70%

c) "?": Los números de curva para el grupo de suelos A sólo ha sido obtenido para el matorral desértico

d) Proponer una correspondencia hidrológica entre asociaciones vegetales es - desde luego - una tarea arriesgada, más aún si se trata de tipos de vegetación tan distantes como los americanos y españoles. No obstante y a falta de trabajos que hayan calibrado el modelo de los números hidrológicos para España, vamos a aventurar la siguiente correspondencia (basada en consideraciones fitoclimáticas y morfológicas referidas a la estructura aérea y a la cobertura del suelo)

Tipo de vegetación del árido americano	Equivalencia para el árido español
1 Herbazal con algo de matorral	↔ Herbazal de <i>Brachypodium retusum</i> con algo de matorral subdesértico
2 Oak brush Mountain mahogany	↔ Coscojar, monte bajo de rebollo [aunque en condiciones de mayor sequedad] ↔ <i>Rhamnus lycioides</i>
3 Pinyon, juniper, o ambos	↔ Sabinar claro de <i>Juniperus thurifera</i> con <i>Pinus nigra</i> dispersos ↔ También: sabinar de <i>Juniperus phoenicea</i> con <i>Pinus halepensis</i>
4 Sagebrush	↔ <i>Artemisia herba-alba</i> <i>Artemisia campestris</i>
5 Matorral desértico (palo verde, mesquite, cactus, etc.	↔ Vegetación del semiárido murciano y almeriense

Las equivalencias establecidas en el cuadro anterior tienen un carácter bastante aproximado siendo en algunos casos la correspondencia muy estrecha. En particular es la última de las equivalencias la que pueda considerarse más ajustada debido a las adaptaciones tan similares que han desarrollado los vegetales del Nuevo y Viejo Mundo en respuesta a condiciones climáticas tan extremas de sequía y calor (Oria de Rueda, 1995; com. pers.).

Así resulta muy ilustrativo comprobar que buena parte de las especies citadas en la descripción del tipo de vegetación americano para 'matorral desértico' tienen su "hermano gemelo" en el Sureste Español.

Larrea tridentata ≅ *Thymelaea hirsuta*

Atriplex reptans ≅ *Atriplex glauca*

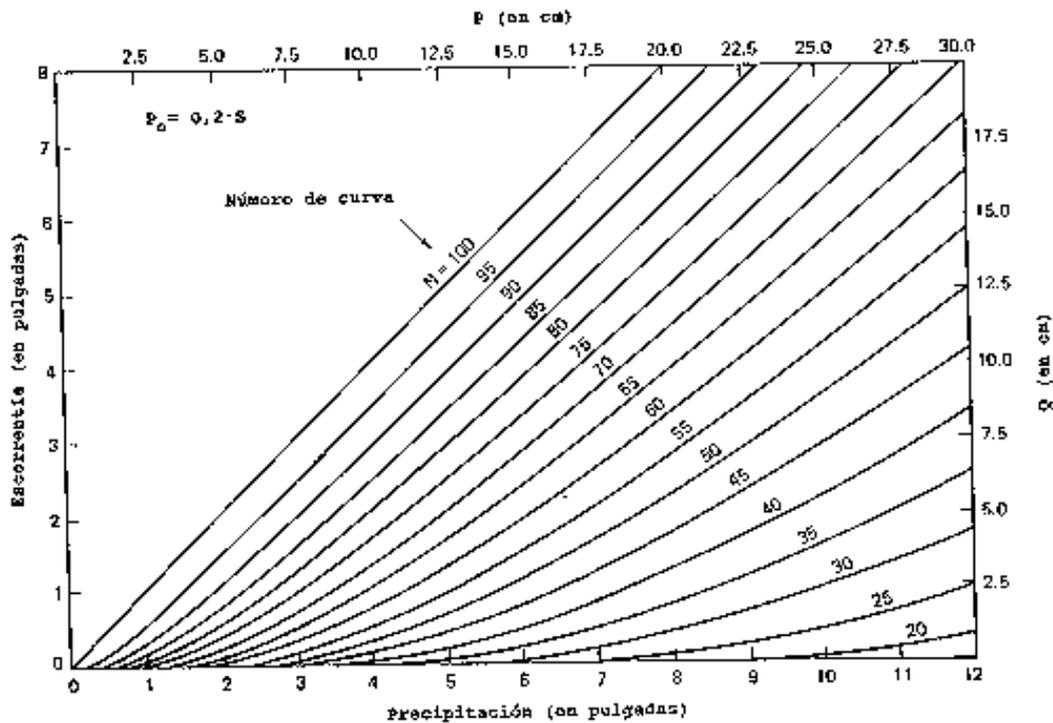
Prosopis glandulosa ≅ *Zizyphus lotus*; *Rhamnus lycioides*

Una vez se tiene el número de curva fijado (N), la obtención de la escorrentía superficial generada por una precipitación (P > P_o) es inmediata. Basta con aplicar las dos fórmulas siguientes:

$$P_o = 0,2 \cdot \frac{25.400 - 254 \cdot N}{N} \quad (\text{mm})$$

$$Q = \frac{(P - P_o)^2}{P + 4 \cdot P_o} \quad [P \text{ y } Q \text{ en mm }]$$

Si se desea, también puede usarse el siguiente ábaco que no es sino la representación gráfica del modelo.



Se entra en abscisas con la precipitación del aguacero y se traza una vertical hasta alcanzar la curva correspondiente al número hidrológico hallado. Este nivel indica la escorrentía superficial generada, dato que se lee en la escala de ordenadas.

* * *

En principio, el modelo del número de curva no hace intervenir al tiempo aunque - como ya ha quedado dicho - el ajuste se ha realizado con precipitaciones diarias. Ello no impide que con este modelo se pueda obtener la escorrentía superficial acumulada (o lluvia neta acumulada) desde el comienzo del aguacero hasta un instante dado, ya que:

$$\sum Q = \frac{[\sum P - P_0]^2}{\sum P + 4 \cdot P_0} \quad \text{si } \sum P > P_0$$

siendo $\sum Q$ la escorrentía superficial acumulada

$\sum P$ la precipitación acumulada (pluviograma)

Para obtener la escorrentía o lluvia neta de un determinado intervalo bastará con restar $\sum Q(t+1)$ de $\sum Q(t)$.

* * *

De una forma implícita, el modelo considera una tasa de infiltración variable con el tiempo y que tiende de forma asintótica a cero si el aguacero dura indefinidamente.

En el desarrollo conceptual del método se define la retención real de agua (R_r) como la cantidad de agua que se infiltra en el terreno una vez se ha alcanzado el umbral de escorrentía (P_0).

$$R_r = P - Q - P_0$$

Por otro lado y de acuerdo con la hipótesis principal del modelo:

$$\frac{R_r}{S} = \frac{Q}{P - P_0}$$

Al combinar ambas ecuaciones nos queda:

$$R_r = \frac{S \cdot (P - P_0)}{P - P_0 + S}$$

Si derivamos teniendo en cuenta que P_0 y S son constantes para un aguacero, se obtiene:

$$\frac{dR_r}{dt} = \frac{S^2 \cdot \frac{dP}{dt}}{(P - P_0 + S)^2}$$

Esta última ecuación puede interpretarse como la función explícita de la tasa de infiltración del modelo. Se observa que si la precipitación tiende a infinito, la tasa de infiltración (o de retención, $\frac{dR_r}{dt}$) tiende a cero. Ello resulta coherente con las bases del método ya que la retención máxima posible (S) quedará satisfecha en semejante episodio de lluvia.

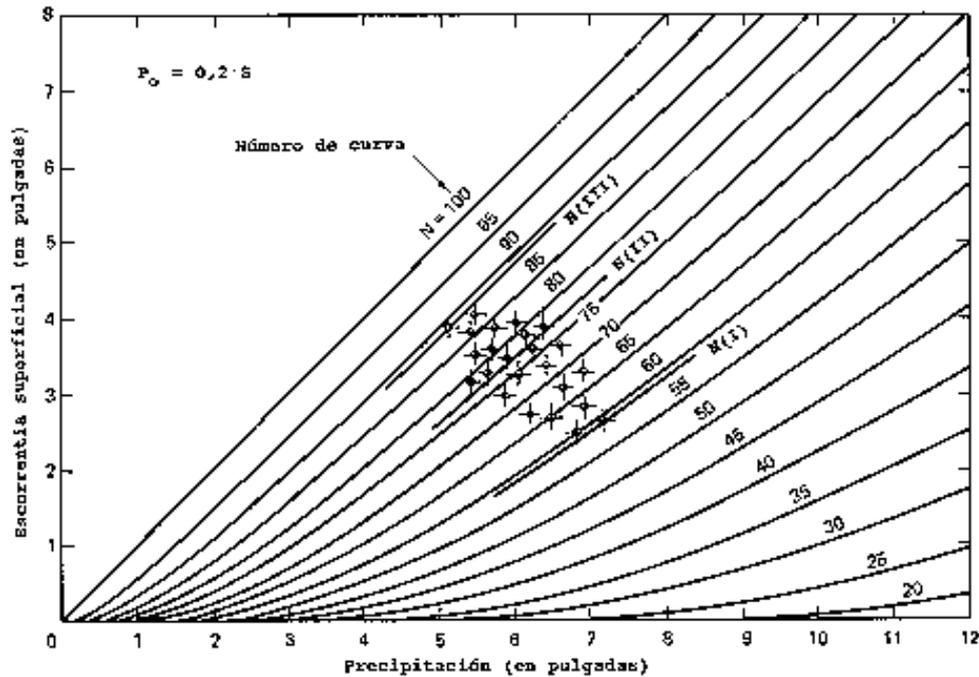
$$\lim_{P \rightarrow \infty} \frac{dR_r}{dt} = 0 \text{ mm/h}$$

Por otro lado, al aumentar la intensidad de lluvia (dP/dt) la tasa de retención real de agua en la cuenca aumenta, lo que no parece tener una buena justificación física.

4) Estimación del número de curva a partir de datos de campo

El número de curva o - lo que es lo mismo - la retención máxima posible (S) o el umbral de escorrentía (P_0) se pueden estimar si se conoce un número suficiente y representativo de parejas de valores de precipitación y escorrentía (P_i, Q_i) acaecidos en la cuenca o terreno a estudiar.

Un primer método consiste en situar todas las parejas de valores en una gráfica auxiliar y hallar el centro de gravedad de la nube de puntos resultante. Su situación nos permite determinar el valor del número de curva (en condición II) de la cuenca o terreno estudiado. Otra posibilidad es la de determinar directamente de la nube de puntos los tres números de curva asociados ($N(I)$, $N(II)$ y $N(III)$), tal y como se hace en la figura adjunta: $N(II)$ define una curva que separa la nube de puntos en dos porciones iguales, $N(I)$ define la envolvente inferior y $N(III)$ la envolvente superior.



En el método analítico se impone que la varianza del error relativo cometido (diferencia entre la escorrentía estimada y la escorrentía medida) sea mínima. Este cálculo puede realizarse para todo el conjunto de parejas de valores, en cuyo caso se obtiene $N(II)$, o bien se puede dividir el conjunto de datos en tres grupos (según fueran las condiciones previas de humedad al inicio de cada aguacero) para después realizar el cálculo antes mencionado, con lo que obtendremos los tres números de curva asociados ($N(I)$, $N(II)$ y $N(III)$).

5) Ventajas e inconvenientes del modelo

De acuerdo con la bibliografía consultada para desarrollar este capítulo [Aparicio (1989); Chow et al (1988); Dunne et al (1978); Haan et al (1982); McCuen (1982); Ponce (1989); Singh (1989); Varios (1983); Varios (1985); Varios (MOPU, 1987); Varios (MOPU, 1990)], las virtudes y defectos del método del número de curva pueden resumirse en los siguientes puntos:

-A- VENTAJAS

- a) Simplicidad de uso
- b) Considera los principales factores del fenómeno
- c) Buen ajuste a infinidad de datos experimentales que contemplan la práctica totalidad de las situaciones posibles
- d) Método muy empleado en cuencas no aforadas por ofrecer datos suficientemente fiables y precisos

-B- LIMITACIONES

- a) Modelo empírico cuyas hipótesis de partida no están plenamente justificadas desde el punto de vista físico.
Las simplificaciones del método con respecto al proceso real se hacen sobre todo patentes al comprobar que no considera ni la intensidad ni la duración del aguacero.
- b) Problemas de escala (tanto espaciales como temporales)
Puesto que el ajuste del modelo se ha hecho con datos de tormentas de larga duración (≈ 1 día) e intensidad "apreciable" y para cuencas vertientes de al menos varios km^2 , la estimación de volúmenes de escorrentía directa en superficies pequeñas ante aguaceros cortos puede ser bastante imprecisa.
- c) Las simplificaciones y empirismo del método le hacen poco adecuado para la predicción de la infiltración originada por un aguacero [sirve sólo como primera aproximación].

ANEXO V

Análisis comparado de los números de curva e interpretación de las distintas combinaciones

El modelo MODIPE precisa tres números de curva para su funcionamiento: el de la ladera actual (NAC), el del área de impluvio (NI) y el del área de recepción (NR). A partir de estos dos últimos datos el programa obtiene el número de curva promedio ($NM = [NI \cdot S1 + NR \cdot S2] / [S1 + S2]$).

Al incluir un alcorque en el área de recepción, la escorrentía superficial que escapa fuera de la unidad se reduce considerablemente. El efecto hidrológico de tal trampa de agua puede englobarse en un número de curva equivalente (NEQ) que se calcula a partir de la precipitación límite (o umbral) de la unidad sistematizada (P2).

En consecuencia, MODIPE opera con cinco números de curva: los cuatro primeros (NAC, NI, NR y NM) se refieren a las características hidrológicas del terreno y el quinto (NEQ) al funcionamiento global de la sistematización primaria considerando el efecto del microembalse.

Vamos a analizar las distintas combinaciones posibles, a interpretar su significado y a prever las situaciones en las que se pueden dar tales combinaciones numéricas.

Antes de afrontar este análisis conviene reflexionar brevemente sobre el efecto que tienen las preparaciones del suelo desde el punto de vista hidrológico. Según Serrada (1993) y Fernández Yuste et al (1994), los objetivos que se persiguen con la preparación del suelo para la repoblación pueden ser los siguientes:

- 1- Facilitar las labores de plantación o de siembra
- 2- Eliminar o reducir las posibilidades de invasión del matorral

- en la zona donde se instala la planta (*)
- 3- Aumentar la profundidad útil del perfil, disgregando capas profundas mediante acción mecánica (**)
 - 4- Propiciar la penetración de las raíces de las plantas introducidas
 - 5- Mejorar la estructura y aumentar la porosidad (al menos de forma transitoria) (**)
 - 6- Acrecentar la capacidad de retención de agua del perfil, a través del aumento de profundidad y de la elevación temporal de la porosidad que se produce con el esponjamiento del suelo (**)
 - 7- Aumentar la velocidad de infiltración como consecuencia del mullido que se consigue con la labor (*) ← [?]
 - 8- Incrementar el área de captación de agua y/o la capacidad de almacenamiento de agua encharcada mediante la variación de la microtopografía (**)
 - 9- Favorecer la movilización y solubilización de compuestos minerales
 - 10- Acelerar la oxidación de elementos minerales y orgánicos que de esta manera pueden ver mejorada su asimilabilidad por las plantas o disminuida su toxicidad
 - 11- Reducir el coeficiente de conductividad térmica atenuando la oscilación de temperaturas en el suelo
 - 12- Favorecer la vida microbiana

De los doce puntos enunciados la mitad^(*) redundan directamente en la economía del agua. Uno⁻⁸⁻ se refiere específicamente a lo que denominamos sistematización primaria del terreno. Otro⁻²⁻ busca una mejor dotación de agua del repoblado a través de la eliminación de la competencia. Los restantes tienen una clara incidencia en el proceso de infiltración, circulación y retención del agua en el suelo.

En lo que respecta al punto séptimo hay que decir que el efecto favorable mencionado es en muchos casos discutible. Con la eliminación de la vegetación suele quedar el suelo mineral descarnado y desprotegido. Con las primeras lluvias intensas se forma una costra. El impacto directo de la gotas de lluvia sobre la superficie del suelo rompe los agregados poco estables lo que libera partículas finas que - al ser movilizadas - rellenan los

poros y huecos del horizonte superficial. Se forma una cascana (o costra superficial) que ralentiza el proceso de infiltración de manera notable. Así, podemos concluir que lejos de resultar la preparación del suelo beneficiosa a la infiltración resulta en muchas ocasiones claramente perjudicial desde el momento en que se formen tales encostramientos. A este respecto conviene indicar que no todos los suelos tienen igual tendencia al encostramiento. La abundancia de limos y arcillas inestables facilita el proceso mientras que la pedregosidad, la materia orgánica, los residuos vegetales y la abundancia de arenas en superficie lo dificultan. Por otro lado, la formación de una cascana se puede mitigar o evitar incorporando enmiendas orgánicas o placas de mulch en el área de recepción.

La eliminación de la vegetación preexistente por laboreo del suelo [ya sea mediante gradas, arados, subsoladores, rippers, palas, cuchillas, etc.] provoca una evolución del terreno hacia un barbecho, de acuerdo con el método del número de curva. Las condiciones hidrológicas del suelo empeoran lo que se traduce en un aumento del número de curva.

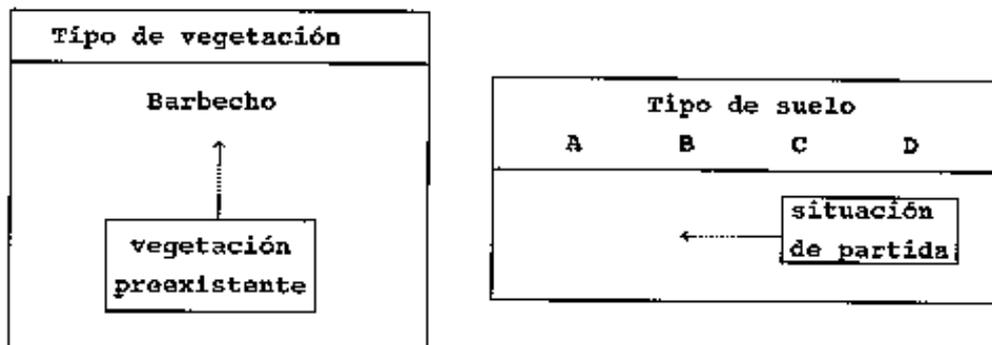
A este efecto negativo de la preparación del suelo desde el punto de vista de la Hidrología de Superficie (por la mencionada formación de costras) se oponen las demás consideraciones hidrológicas enumeradas con anterioridad, a las que no cabe objetar nada en contra. De una forma directa, la creación de áreas de recepción con alcorques o pocetas del tamaño adecuado obliga a una mayor infiltración del agua de lluvia en los lugares de plantación.

Por otro lado, los terrenos sobre los que se suele actuar son litosuelos de muy escaso espesor. Las labores en profundidad que se prescriben para estos casos ayudan a disgregar la roca madre, rompen cementaciones, suelas compactas y aumentan el tamaño del perfil con lo que se mejora su conductividad hidráulica. Si nos apoyamos en el método del número de curva podemos inferir que en muchas ocasiones un subsolado puede modificar las características físicas del suelo hasta hacerlo cambiar de grupo; por ejemplo pasándolo desde un suelo del tipo 'D' hasta otro del grupo 'C'.

Otra consideración importante es la que se refiere al aumento de la capacidad de retención de agua en el perfil⁴. Si con la preparación del suelo reducimos su densidad aparente se habrán formado poros de aire que pueden almacenar agua. Esto se consigue realizando las labores con el tempero adecuado, es decir: con los suelos bien secos. Sólo de esta manera se asegura el pretendido esponjamiento. En cambio, si se realiza la labor con el suelo excesivamente húmedo lejos de lograr un mullido podemos provocar una compactación de efectos contrarios a los deseados.

En el modelo MODIPE no se contempla este fenómeno pues atañe a la Hidrología Edáfica en vez de a la Hidrología Superficial. Sin embargo, queremos significar que MODIPE asociado a cualquier balance hídrico del suelo nos permite simular y evaluar este doble juego. Con MODIPE se obtiene la cantidad de agua disponible (infiltrada) en un punto de la ladera, dato que debe sustituir a la precipitación si se quiere establecer un balance hídrico realista. Con estas precipitaciones (modificadas por la escorrentía y el microrelieve) se entra en el balance hídrico del suelo que se considere más conveniente (ficha hídrica de Thornthwaite, diagramas bioclimáticos de Montero de Burgos, régimen de humedad del suelo según el 'Soil Survey Staff', etc.). De esta forma se pueden obtener conclusiones microclimáticas mucho más atinadas que si se utilizan los datos pluviométricos directamente sin considerar el importante efecto que tiene la escorrentía superficial en la infiltración.

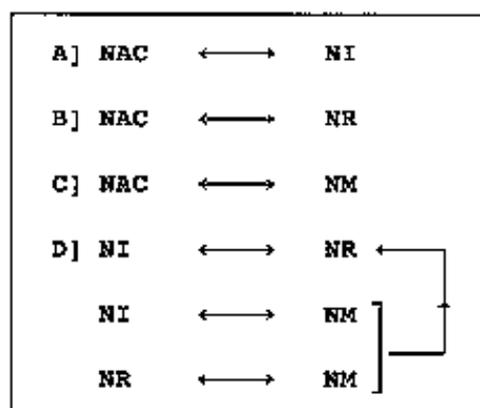
Desde el punto de vista del método de los complejos hidrológicos y como resumen podemos concluir que cualquier preparación del suelo modifica el número de curva: por un lado disminuimos la cobertura vegetal lo que nos aproxima hacia un barbecho y por otro lado se alteran las condiciones edáficas lo que puede cambiar la clasificación del suelo. Ambos efectos son contrapuestos. Así, en ciertos casos el número de curva aumentará y en otros disminuirá respecto de la situación de partida dependiendo del tipo de suelo, del tipo de vegetación existente, del tipo de labor y del tempero que tenga el terreno al realizar la misma.



Evolución esquemática del número de curva en un suelo somero al realizar una labor profunda

El análisis comparado de los números de curva que maneja el modelo MODIPE consiste en confrontar dos a dos cada uno de los mencionados valores. Nos vamos a centrar en los cuatro números de curva que describen el comportamiento hidrológico de la unidad, sin considerar el efecto alcorque que ya ha sido abordado con anterioridad.

Cabe concebir seis casos posibles. Sin embargo, al ser uno de los números de curva (NM) una ponderación por superficies de otros dos números (NR y NI), el estudio se puede reducir a cuatro casos, tal y como se esquematiza en la figura siguiente.



Caso A: Comparación de la ladera actual con el área de impluvio

Si no se actúa en el área de impluvio los dos números de curva coincidirán: $NAC = NI$.

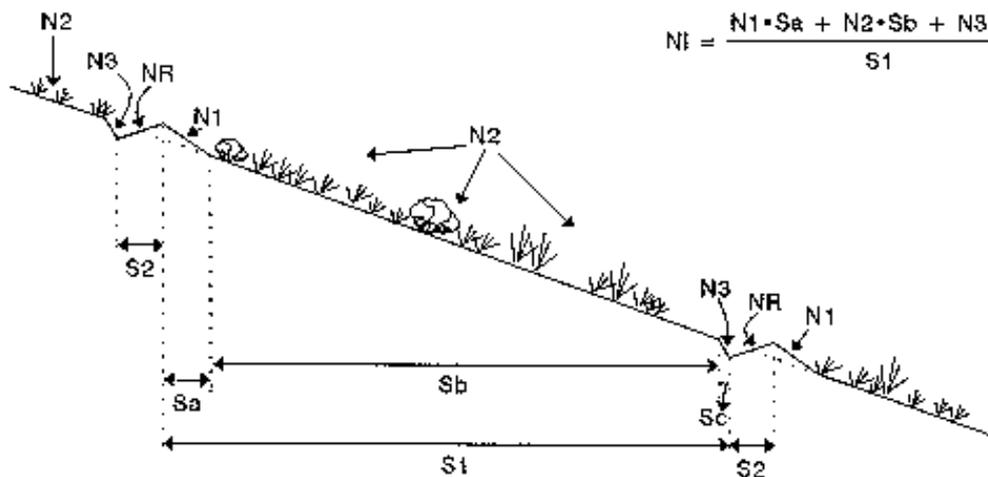
Una intervención posible consiste en realizar tratamientos en el área productora para incrementar la cosecha de agua en el área de recepción. La eficiencia de escurrido del área de impluvio se puede aumentar usando diversas sustancias químicas, extendiendo membranas impermeables, compactando y alisando el terreno o - simplemente - eliminando o disminuyendo la vegetación natural existente así como la pedregosidad superficial. Con cualquiera de estas actuaciones se aumenta el número de curva de manera que:

$$NAC < NI$$

Una preparación del suelo bastante utilizada en la repoblación de laderas degradadas y que provoca efectos similares a los descritos en el párrafo anterior, es el aterrazado en contrapendiente. La formación de desmontes y terraplenes incrementa el número de curva del área productora con relación a la ladera sin sistematizar, ya que tanto los desmontes como los terraplenes tienen números de curva muy elevados. El área de impluvio que resulta de esta actuación está formada por tres complejos hidrológicos, como se puede apreciar en la figura adjunta.

$$Sa + Sb + Sc = S1$$

$$NI = \frac{N1 \cdot Sa + N2 \cdot Sb + N3 \cdot Sc}{S1}$$



Caso B: Comparación de la ladera actual con el área de recepción

Este análisis evalúa la actuación en el área colectora con respecto a las condiciones de la ladera degradada original (NR \leftrightarrow NAC).

Desde el punto de vista de la economía del agua, en el área de recepción interesa una preparación del suelo que mejore su capacidad de infiltración lo que equivale a disminuir el número de curva con relación al existente en la ladera inalterada, es decir:

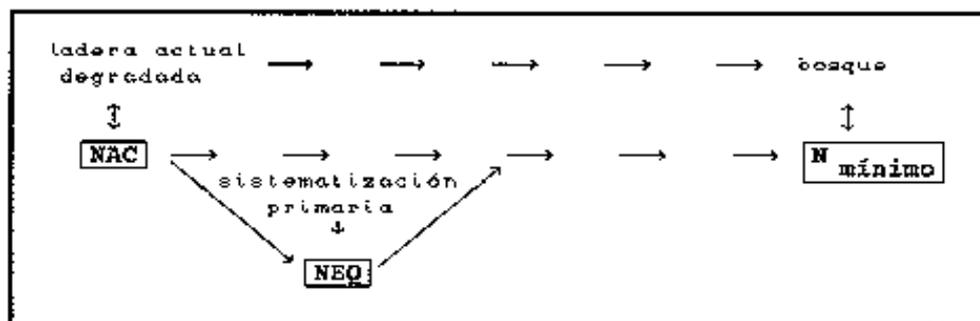
$$NR < NAC$$

La eliminación de la vegetación preexistente aproxima al terreno a una situación de barbecho y eleva su número de curva. Por el contrario, el aumento del espesor del perfil y de su porosidad surten un efecto beneficioso para la entrada de agua en el suelo. Mediante sencillos ensayos de infiltración en la ladera degradada y en el área de recepción se puede determinar cuál de los dos efectos antagónicos resulta preponderante en cada caso concreto que debamos afrontar. Estos ensayos de campo tienen especial interés ya que orientan sobre los efectos hidrológicos reales de una preparación del suelo. Si los ensayos son previos a la repoblación y si se utilizan diferentes técnicas de preparación podemos llegar a definir el método más apropiado para el lugar de estudio (Vivar et al, 1994).

La adición de enmiendas en el área de recepción encarece los trabajos de repoblación pero puede ser conveniente e incluso necesaria para el arraigo y primer crecimiento del repoblado en zonas extremadamente áridas y degradadas. Estas intervenciones persiguen una mejora de las condiciones físicas del suelo puesto que la fertilidad no suele ser un factor limitante cuando se trabaja con especies frugales. Mediante una enmienda orgánica (estercolado, aporte de purines), o una enmienda química (enyesado de suelos sódicos, encalado de suelos ácidos), o mediante un acolchado (placas de mulch para evitar encostramientos), o aplicando sustancias sintéticas que mejoren la estructura y capacidad de retención de agua del suelo (polímeros) se puede llegar a reducir el número de curva del área colectora de forma notoria con respecto a la ladera original.

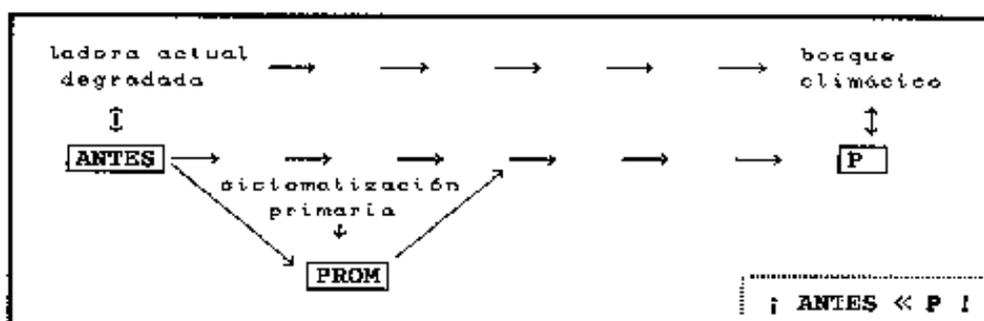
Una preparación del suelo en la que el número de curva resultante sea mayor que el de la ladera actual ($NR > NAC$) puede tener plena justificación técnica y práctica aunque resulte contraria a nuestros objetivos inmediatos de favorecer la infiltración en el área colectora.

Si el repoblado arraiga y crece adecuadamente, con el paso de los años la evolución progresiva de la vegetación conlleva una mejoría de las condiciones edáficas, entre otras un aumento de la capacidad de infiltración y - por ende - una disminución del número de curva. De hecho, podemos hablar de una evolución progresiva de los parámetros hidrológicos del suelo paralela a la evolución vegetal.



Serie progresiva del número de curva

En muchos casos y gracias a la labor repobladora de nuestros predecesores en zonas afines, podremos estimar la velocidad del proceso y su incidencia en cuanto a la reducción de la escorrentía superficial. Si además tenemos la suerte de que algún monte arbolado 'climácico' ha sobrevivido indemne a nuestros ancestros, estaremos en disposición de confirmar la sospecha de que los montes mediterráneos evolucionados aprovechan (infiltran) la práctica totalidad de las precipitaciones que reciben, por muy torrenciales que estas sean. En tal caso la serie temporal progresiva que proponemos a continuación sobre disponibilidades hídricas en ladera , tendrá plena validez en la zona:



Serie progresiva de las disponibilidades hídricas en una ladera degradada

Si no se realizan los ensayos de infiltración comparados que recomendamos, lo lógico es ponerse en una situación neutra (o incluso pesimista) respecto de la situación de partida, es decir:

$$NAC \leq NR$$

De esta manera el diseño de la unidad sistematizada resulta conservador. O dicho de otra manera: la hipótesis de cálculo ($NAC \leq NR$) exige unos microembalses mayores que aumentan la probabilidad de endorreísmo del sistema.

Caso C: Comparación de la ladera actual con el número de curva promedio

En el caso de que el número de curva actual resulte inferior al número de curva promedio ($NAC < NM$), la actuación en la ladera la hace menos receptiva al agua. La inclusión de caballones o alcorques que retengan el agua de escorrentía en los puntos de plantación es conveniente (incluso necesaria) para incrementar las disponibilidades hídricas promedio de la ladera desde el comienzo de la intervención.

En el caso contrario ($NAC > NM$) y especialmente si la disminución del número de curva se debe al área de recepción, estaremos ante una situación favorable a la economía del agua.

Caso D: Comparación del área de impluvio con el área de recepción

Esta comparación entre números de curva es fundamental dentro del modelo que hemos desarrollado; tanto es así que conduce a ecuaciones de cálculo diferentes.

Si el número de curva del área de impluvio es mayor que el número de curva del área de recepción ($NI > NR$) estamos ante una situación favorable en la que la capacidad de infiltración del área colectora es mayor que la del área productora. Sin necesidad de alcorque se consigue una mayor disponibilidad hídrica en el área de recepción, proceso que se puede reforzar mediante muretes.

Si el número de curva del área de recepción es superior al del área de impluvio ($NR > NI$), la unidad sistematizada tiende a infiltrar más agua en el área productora que en el área de recepción, lo que se opone a nuestros objetivos. Esta inercia debe evitarse mediante trampas de agua del tamaño conveniente ($CAPA \geq CAPMIN$; ec. [43]) en el área colectora.

Si los números de curva en el área de impluvio y en el área de recepción coinciden, tenemos una situación neutra. Si además resultan iguales al número de curva de la ladera degradada ($NR = NI = NAC$) la actuación es totalmente indiferente desde el punto de vista de la economía del agua, a no ser que incorporemos alcorques.

Las comparaciones $NI \leftrightarrow NM$ o $NR \leftrightarrow NM$ equivalen a la que tenemos planteada ($NI \leftrightarrow NR$). En el siguiente cuadro indicamos su correspondencia.

$NI < NM$	\longleftrightarrow	$NR > NM$	\longleftrightarrow	$NI < NR$
$NI = NM$	\longleftrightarrow	$NR = NM$	\longleftrightarrow	$NI = NR$
$NI > NM$	\longleftrightarrow	$NR < NM$	\longleftrightarrow	$NI > NR$

El programa MODIPE compara los números de curva introducidos por el usuario. Estas combinaciones numéricas pueden ser más o menos favorables para la economía del agua en la ladera, lo que implica una menor o mayor necesidad de alcorques. En este sentido MODIPE ofrece los siguientes mensajes por pantalla:

* Si	$\left\{ \begin{array}{l} NAC > NI \\ NAC > NR \\ NI \geq NR \end{array} \right\}$	\implies	Situación muy favorable para la economía del agua
* Si	$NAC > NM$	\implies	Situación favorable para la economía del agua
* Si	$NAC = NI = NR$	\implies	Situación neutra si no se crean trampas de agua [ladera inalterada]
* Si	$\left\{ \begin{array}{l} NAC < NM \\ NI < NR \end{array} \right\}$	\implies	La creación de trampas de agua resulta indispensable
* Resto de casos		\implies	Se aconseja crear trampas de agua

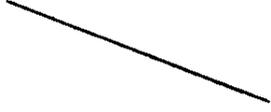
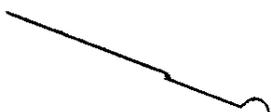
Desde el punto de vista de la economía hídrica y para favorecer las cosechas de agua en el área de recepción, la preparación ideal del suelo de una ladera degradada queda definida mediante estas tres inecuaciones:

$$NAC > NR \quad \text{y} \quad NI > NR \quad \text{y} \quad NI \geq NAC$$

debiendo tener el alcorque - además - un tamaño suficiente para evitar la escorrentía fuera de la unidad.

Una situación en la que se satisfagan las dos primeras desigualdades pero en la que el número de curva del área de impluvio sea menor que el de la ladera degradada ($NI < NAC$), resulta aún más propicia para conseguir infiltrar todas las precipitaciones que caigan en la ladera. Sin embargo, las aportaciones del área productora serán inferiores con lo que las cosechas de agua resultarán menos copiosas para el repoblado en su primera etapa de arraigo y crecimiento.

Para finalizar ofrecemos una tabla que resume los efectos hidrológicos que tienen las distintas técnicas de preparación del suelo utilizadas en el ámbito forestal, de acuerdo con los parámetros que maneja el modelo MODIPE.

	LABOR	ESQUEMA	NUMEROS DE CURVA	CAPA
0	ladera inalterada		$NI = NR = NAC$	0
1	ahoyado con alcorque; microcuencas		$NI = NAC$ $NR \neq NAC$ (1)	> 0
2	acaballonado (alomado según curvas de nivel)		$NI = NAC$ $NR \neq NAC$ (1)	> 0
3	acaballonado superficial		$NI > NAC$ $NR \neq NAC$ (1)	> 0
4	aterrazado en contrapendiente		$NI > NAC$ $NR \neq NAC$ (1)	> 0
5	subsulado lineal subsulado pleno		$NI = NAC$ $NR < NAC$ (2)	≈ 0
6	laboreo pleno (según curvas de nivel)		$NI = NR > NAC$ (3)	≈ 0
<p>Notas: (1): A falta de ensayos de campo y para estar del lado de la seguridad $NR > NAC$</p> <p>(2): en litosuelos y estando el terreno seco [a tempero]</p> <p>(3): efecto hidrológico global <u>negativo</u>, pues el aumento del número de curva predomina sobre $CAPA$ (≈ 0)</p>				

Efectos hidrológicos inmediatos de las diferentes técnicas de preparación del suelo en repoblaciones forestales (según MODIPE)

Los datos de cada mes van correlativos y ocupan una línea. Si se trata de datos pluviométricos la fila comienza con "PR", si se trata de datos termométricos la línea empieza por "TR".

Para las precipitaciones la base de datos adopta el siguiente orden:

Columna	Significado
1 - 2	PR
3	CUENCA HIDROGRAFICA
4 - 6	INDICATIVO DE LA ESTACION
7	LETRA DE LA ESTACION
8 - 9	AÑO (LAS DOS ULTIMAS CIFRAS)
10 - 11	MES (EN CIFRAS)
14 - 18	PRECIPITACION TOTAL
19 - 22	PRECIPITACION MAXIMA DIARIA
23 - 24	DIA 1 ^º DE LA MAXIMA
25 - 26	DIA 2 ^º DE LA MAXIMA
27	VIENTO DOMINANTE
28	VIENTO EN LA MAXIMA
29 - 30	DIAS DE LLUVIA
31 - 32	DIAS DE NIEVE
33 - 34	DIAS DE GRANIZO
35 - 36	DIAS DE TORMENTA
37 - 38	DIAS DE NIEBLA
39 - 40	DIAS DE ROCIO
41 - 42	DIAS DE ESCARCHA
43 - 44	DIAS EN QUE LA NIEVE CUBRE EL SUELO
45 - 46	DIAS DE "METEORO PRECIP." (NO ESP.)
47 - 48	DIAS DE PRECIPITACION INAPRECIABLE
49 - 50	DIAS DE PRECIPITACION APRECIABLE ($\geq 0,1$ mm)
51 - 52	DIAS DE PRECIPITACION ≥ 1 mm
53 - 54	DIAS DE PRECIPITACION ≥ 10 mm
55 - 56	DIAS DE PRECIPITACION ≥ 30 mm

Las precipitaciones van en décimas de milímetro.

IP significa inapreciable ($< 0,1$ mm), VR varios días.

Un espacio en blanco indica que falta el dato.

En cuanto a la dirección del viento, el significado de la clave es: 1 = NE; 2 = E; 3 = SE; 4 = S
 5 = SO; 6 = O; 7 = NO; 8 = N
 9 = variable; 0 = calma

Ejemplo:

	año	P.máx.	
	↓↓	↓↓↓↓	
PR3322E7001	2317	43010	15 0 0 0 0 0 0 0 0 0 01515 9 2
	↓↓	↓↓	
mes	P.mes		

Los termorresúmenes presentan la siguiente estructura:

Columna	Significado
1 - 2	TR
3	CUENCA HIDROGRAFICA
4 - 6	INDICATIVO DE LA ESTACION
7	LETRA DE LA ESTACION
8 - 9	AÑO (LAS DOS ULTIMAS CIFRAS)
10 - 11	MES (EN CIFRAS)
14 - 17	TEMPERATURA MAXIMA DEL MES
18 - 19	1 ^o DIA DE LA MAXIMA
20 - 21	2 ^o DIA DE LA MAXIMA
22 - 25	TEMPERATURA MINIMA DEL MES
26 - 27	1 ^o DIA DE LA MINIMA
28 - 29	2 ^o DIA DE LA MINIMA
30 - 33	TEMPERATURA MEDIA DE LAS MAXIMAS
34 - 37	TEMPERATURA MEDIA DE LAS MINIMAS
38 - 41	TEMPERATURA MEDIA DEL MES
42 - 45	TEMPERATURA MEDIA A LAS 8 h.
46 - 47	DIAS DE TEMPERATURA MINIMA ≤ -5 °C
48 - 49	DIAS DE TEMPERATURA MINIMA ≤ 0 °C
50 - 51	DIAS DE TEMPERATURA MAXIMA ≥ 20 °C
52 - 53	DIAS DE TEMPERATURA MAXIMA ≥ 25 °C
54 - 55	DIAS DE TEMPERATURA MAXIMA ≥ 30 °C

Las temperaturas vienen en décimas de grado.

Un espacio en blanco indica que falta el dato.

Ejemplo:

TR4609F86 6 37013 902122 298 138 218 157 0 0 12918

Nota:

Existen diversos procedimientos para ver las estaciones que contiene un archivo del I.N.M. Un método sencillo consiste en utilizar el comando "find" del MS-DOS.

```
find "MO" archivo.inm > estacio.nes
```

Al pulsar a la tecla "intro" después de escribir la expresión anterior el ordenador crea un archivo (llamado estacio.nes) con los números y nombres de todas las estaciones meteorológicas contenidas en el fichero fuente (llamado archivo.inm en el ejemplo)

Para ver las estaciones por pantalla hay que escribir:

```
type estacio.nes|more    y pulsar a la tecla "intro".
```

También podemos sacar esta información por impresora:

```
print estacio.nes
```

o bien directamente, sin crear el archivo estacio.nes, tecleando la expresión:

```
find "MO" archivo.inm > prn
```

ANEXO VII

Método de los aguaceros virtuales

Los datos que ofrece el Instituto Nacional de Meteorología de toda su amplia red de estaciones (tanto si son de primer, segundo o tercer orden) en formato papel o en soporte informático son resúmenes en los que se pierde parte de la información original. Así, en las tarjetas pluviométricas que de forma tradicional han venido enviando los observadores de las estaciones al I.N.M. se individualizan, caracterizan y datan todas las precipitaciones diarias del mes.

Día	PRECIPITACION mm	METEOROS OBSERVADOS			VIENTO DOMINANTE	Nombre de la Estación	
		m	l	n		Provincia	Número
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10					Suma		
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19					Suma		
20							
21							
22							
23							
24							
25							
26							
27							
28							
29							
30					Suma		
31							
Precipitación total del mes					_____ mm		

NUMERO DE DIAS DE:	
Lluvia	● _____
Nieve	* _____
Granizo	△ _____
Tormenta	⚡ _____
Niebla	☁ _____
Rocío	☁ _____
Escarcho	☁ _____
Nieve cubrió suelo	☁ _____

DIAS DE PRECIPITACION	
<0,1 (ip.)	_____
≥0,1	_____
≥1,0	_____
≥10,0	_____
≥30,0	_____

PRECIPITACION MAXIMA EN UN DIA	_____ mm. dia
Viento dominante	_____
En los días de lluvia	_____
En el día de mas lluvia	_____

En la elaboración posterior de la información, el I.N.M. agrupa las precipitaciones en diferentes bloques, lo que sin duda facilita el manejo de dicha información. Sin embargo, para algunos métodos hidrometeorológicos, como p. ej.: el modelo del número de curva, este tratamiento de la información resulta inconveniente. Mientras que con los datos originales el modelo puede usarse con toda precisión, no ocurre lo mismo con los datos agrupados que ofrece el I.N.M., ya que con ellos no se conocen todas las precipitaciones diarias acaecidas.

La información que se facilita en los pluviogramas de la base de datos 'DCAS' distingue cinco bloques de precipitación en cada mes, según la cantidad registrada:

Días de precipitación	
N° de días de P. inapreciable ($< 0,1$ mm):
N° de días de prec. apreciable ($\geq 0,1$ mm): *
N° de días de prec. $\geq 1,0$ mm:
N° de días de prec. $\geq 10,0$ mm:
N° de días de prec. $\geq 30,0$ mm:

A partir de este bloque se puede tratar de reconstruir los datos originales mediante un procedimiento razonable que satisfaga la mencionada distribución. Puesto que en la mayor parte de los meses la solución no es unívoca, hay que definir unas precipitaciones diarias que - además de resultar acordes con los datos de la agrupación - no sean ni demasiado optimistas ni demasiado pesimistas en cuanto a la formación de escorrentía. En este sentido hay que tener presente que para dos aguaceros en los que caigan P mm en conjunto, la distribución que genera más escorrentía es: un chubasco intenso de P mm y el segundo inapreciable. A su vez, la distribución que origina menos escorrentía consiste en dos precipitaciones iguales (de P/2 mm).

Los datos pluviométricos normalmente conocidos son la precipitación mensual, la precipitación máxima diaria y el número de días de precipitación apreciable del mes. Para evaluar la escorrentía del mes puede seguirse el método aproximado que a continuación se expone (Varios, 1985):

Sean en milímetros;

P_m = lluvia total del mes en estudio

M_m = precipitación máxima caída en un sólo día del mes

D_m = número de días de precipitación en el mes

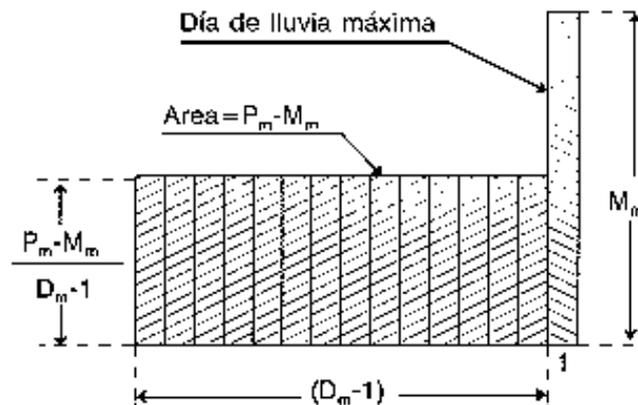
A efectos de escorrentía se deben considerar:

- La producida por la precipitación máxima diaria del mes, M_m
- Las producidas por las lluvias restantes del mes, es decir, por $(P_m - M_m)$ milímetros en $(D_m - 1)$ días.

Siendo desconocida la distribución de estas últimas precipitaciones, establecemos los siguientes casos:

Caso I.- El más desfavorable a efectos de escorrentía: se dará cuando todos los días, excepto el de lluvia máxima, caiga la misma precipitación. El total de la lluvia caída será $(P_m - M_m)$, y como D_m es el número de días de lluvia del mes, la lluvia media caída en los $(D_m - 1)$ días restantes valdrá:

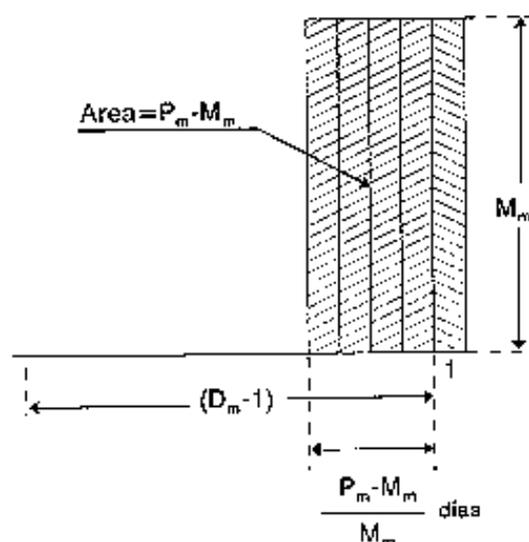
$$P_{v1} = \frac{P_m - M_m}{D_m - 1} \quad [\text{precipitación diaria virtual}]$$



Caso I

Caso II.- El más favorable a efectos de escorrentía: se dará cuando apenas haya precipitación en varios días y en los restantes llueva casi igual que el día de lluvia máxima, lo que en el límite nos da un número de días de lluvia similar a la máxima de:

$$n_2 = \frac{P_m - M_m}{M_m} \quad [\text{número virtual de días de lluvia}]$$



Caso II

Caso III.- Debemos considerar un caso intermedio entre los dos anteriores. Para ello tenemos como datos de partida la lluvia media distribuida en los $D_m - 1$ días y que tiene por valor, según acabamos de ver:

$$P_{v1} = \frac{P_m - M_m}{D_m - 1}$$

Por otro lado, hemos fijado el número de días de máxima lluvia:

$$n_2 = \frac{P_m - M_m}{M_m}$$

Para este caso intermedio tomamos como precipitación virtual intermedia (P_{v2}) la semisuma de la lluvia máxima en un día (M_m) y la precipitación media en el resto de los días, o sea:

$$P_{v2} = \frac{1}{2} \cdot \left(M_m + \frac{P_m - M_m}{D_m - 1} \right)$$

De forma análoga, tomamos como número virtual de días (n_1) de precipitación media, la media de los ($D_m - 1$) días menos los días de lluvia máxima, es decir:

$$n_1 = \frac{1}{2} \cdot \left(D_m - 1 - \frac{P_m - M_m}{M_m} \right)$$

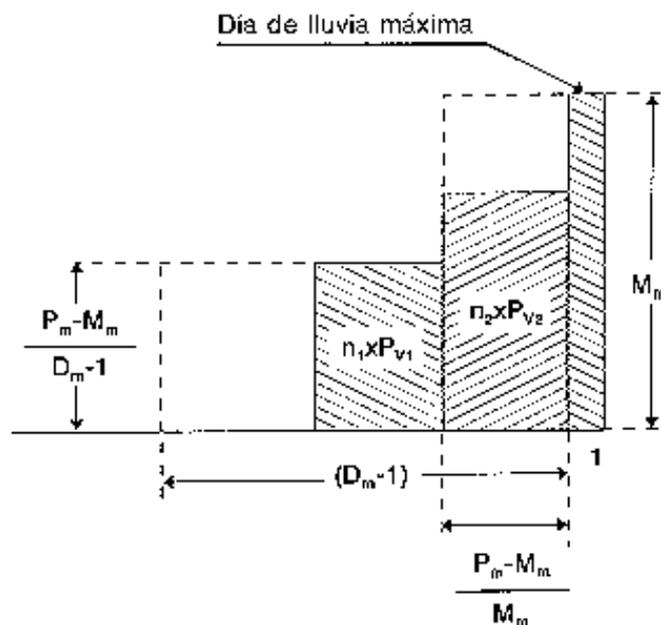
En resumen: la distribución de lluvias propuesta es:

un día caen M_m milímetros (dato seguro),

n_1 días llueve una precipitación virtual diaria de P_{v1} mm y

n_2 días llueve una precipitación virtual P_{v2}

en donde: $M_m + n_1 \cdot P_{v1} + n_2 \cdot P_{v2} = P_m$



Caso III

Para poder aplicar el método del número de curva tenemos que conocer las condiciones previas de humedad para cada aguacero, dato que depende de la precipitación total caída durante los cinco días anteriores al chubasco. A falta de este dato, podemos definir unas condiciones medias de humedad para todo el mes basada en la precipitación media acumulada que cae en cinco días consecutivos del mes.

Si la precipitación mensual (P_m) la consideramos uniformemente distribuida a lo largo del mes (30 días), la cantidad caída en cinco días será:

$$\frac{5}{30} \cdot P_m = \frac{P_m}{6} \quad [\text{valor medio}]$$

El valor mínimo podrá ser, lógicamente, cero (cinco días previos a la lluvia sin precipitaciones). Como valor máximo se puede dar uno, que según el número de días de precipitación en el mes, vale:

$$\text{si } D_m > 5 \quad \longrightarrow \quad M_m + 4 \cdot \frac{P_m - M_m}{D_m - 1} = M_m + 4 \cdot P_{v1}$$

$$\text{si } D_m \leq 5 \quad \longrightarrow \quad P_m$$

De acuerdo con esta argumentación, otros valores medios de precipitación en cinco días consecutivos son:

$$\frac{1}{2} \cdot (M_m + 4 \cdot P_{v1}) \quad \text{y} \quad \frac{P_m}{2}$$

Por lo anterior, tomando la semisuma de los valores medios como cifra representativa de la cantidad de lluvia caída durante cinco días seguidos del mes, se obtienen los valores:

$$\text{Para } D_m > 5 \quad P_5 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{P_m}{6} + \frac{M_m}{2} + 2 \cdot P_{v1} \right) = \frac{P_m}{12} + \frac{M_m}{4} + P_{v1}$$

$$\text{Para } D_m \leq 5 \quad P_5 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{P_m}{6} + \frac{P_m}{2} \right) = \frac{P_m}{3}$$

El algoritmo de cálculo que utiliza el programa MODIPE para transformar el trío de datos mensuales (P_m , M_m y D_m) en precipitaciones diarias es el que acabamos de desarrollar, con la única salvedad de que trabaja con datos reales si el número de días de precipitación es inferior a tres ($D_m \leq 2$).

Si $D_m = 0 \rightarrow$	$M_m = P_{v1} = P_{v2} = 0$
Si $D_m = 1 \rightarrow$	$M_m = P_m$ y $P_{v1} = P_{v2} = 0$
Si $D_m = 2 \rightarrow$	$M_m, P_{v1} = P_m - M_m$ y $P_{v2} = 0$
Si $D_m \geq 3 \rightarrow$	M_m, P_{v1} (n_1 veces), P_{v2} (n_2 veces)

Las condiciones de humedad del mes se estiman mediante el parámetro auxiliar P_5 ,

Si $D_m > 5$	$P_5 = \frac{P_m}{12} + \frac{M_m}{4} + P_{v1}$
Si $D_m \leq 5$	$P_5 = \frac{P_m}{3}$

valor que se compara con los intervalos de lluvia acumulada en cinco días que propone el método del número de curva para distinguir entre las condiciones I, II y III de humedad.

condición	parámetro P_5	
	reposo vegetativo	periodo vegetativo
I	menos de 12,5 mm	menos de 35,5 mm
II	de 12,5 a 28 mm	de 35,5 a 53 mm
III	más de 28 mm	más de 53 mm

* * *

Cabe la posibilidad de desarrollar una metodología similar a la expuesta pero más sofisticada y que atienda a los datos reflejados a nivel mensual en los cinco bloques mencionados al comienzo de este anexo. Sin embargo, su utilidad es escasa debido a que los ficheros DCAS del I.N.M. ofrecen estos datos para muy pocas estaciones. Esta es la razón por la que omitimos tal análisis.

Anexo VIII

Listado con los principales símbolos utilizados en este trabajo

- ALTU = altura mínima de las represas para que no haya vertido fuera de la unidad sistematizada [L ; generalmente: mm]
- ANTES = disponibilidad hídrica (= volumen de agua infiltrado) en la ladera degradada sin sistematización [L ; usualmente: $\text{mm} \cong 1/\text{m}^2$]
- c = 'coeficiente de descarga' del rebosadero
[Nota: Por la fórmula utilizada en el texto para la ecuación de descarga de las demasías, este coeficiente no es adimensional: $L^{0,5}/T$; en concreto se cumple la siguiente relación: $c = C \cdot \sqrt{2 \cdot g}$]
- C = coeficiente de gasto [adimensional]
- CAPA = capacidad del microembalse [L^3 ; usualmente: l]
- CAPAL = Capacidad mínima del alcorque para retener toda la lluvia neta (= escorrentía) que se produce en una unidad sistematizada ante el (o los) aguacero(s) analizado(s) [L^3 ; en litros]
- CAPMIN = capacidad mínima que debe tener el alcorque para que la escorrentía en el área de impluvio comience antes que la escorrentía que escapa de la unidad sistematizada [L^3 ; en litros]
- D = duración del aguacero [T ; en h o min]
- DESP = disponibilidad hídrica (= volumen de agua infiltrado) en el área de recepción [L ; usualmente: $\text{mm} \cong 1/\text{m}^2$]
- $D_m = DM$ = número de días de lluvia del mes [adimensional]
- c = e(t) = intensidad de escorrentía (= lluvia neta) generada en el área de impluvio en el instante t [L/T ; normalmente: mm/h]
- E_s = escorrentía superficial [L^3 ; en general: l // también puede referirse a una superficie, en cuyo caso: $L^3/L^2 = L$; se suele trabajar en $\text{mm} \cong 1/\text{m}^2$)
- E_{si} = $ES1$ = escorrentía superficial generada en el área de impluvio y que alimenta al área de recepción [L^3 o L; en litros o en litros por metro cuadrado de área de impluvio o de área de recepción, según interese]

E_{s2} = ES2 = escorrentía que se va del área de recepción (de la unidad sistematizada) [L^3 o L^3/L^2 ; en l o mm]
 $f(t)$ = capacidad de infiltración del área de impluvio [L/T; se suele dar en mm/h]
 $f_r(t)$ = capacidad de infiltración del área de recepción [L/T ; en mm/h]
 $F(h)$ = ecuación de descarga para las demasías en una unidad sistematizada = caudal desaguado por los rebosaderos del microembalse [L^3/T]
 f_0 = F0 = capacidad de infiltración inicial en el área de impluvio [L/T; en mm/h]
 f_c = FC = capacidad de infiltración final en el área de impluvio [L/T; en mm/h]
 g_0 = G0 = capacidad de infiltración inicial en el área de recepción [L/T; en mm/h]
 g_c = GC = capacidad de infiltración final en el área de recepción [L/T; en mm/h]
 $h = h(t)$ = carga de vertido en el instante t [L ; en m o mm]
 H = altura de las represas o profundidad del alcorque [L ; en general: mm]
 $i(t)$ = intensidad de lluvia en el instante t [L/T ; normalmente: en mm/h]
 I = infiltración [L^3/L^2 ; usualmente: mm]
 J = condición previa de humedad [adimensional]
 $k = K$ = intensidad de lluvia constante [L/T ; en mm/h]
 k_s = conductividad hidráulica a saturación [L/T ; en mm/h]
 L = ancho medio del rebosadero [L ; en m]
 MAX = escorrentía máxima que puede escapar de la sistematización para alcorque nulo [L^3 ; en litros]
 M_m = MM = precipitación máxima diaria del mes [L ; en mm]
 N = número de curva [adimensional]
 NAC = número de curva de la ladera actual (de la ladera degradada) [adimensional]
 NEQ = número de curva de la unidad sistematizada considerando el efecto del microembalse [adimensional]
 NI = número de curva del área de impluvio [adimensional]
 NM = número de curva promedio de la unidad sistematizada sin considerar el efecto del alcorque [adimensional]

NR = número de curva del área de recepción [adimensional]
 P = precipitación [$L^3/L^2 = L$; usualmente: mm o l/m^2]
 PAC = umbral de escorrentía de la ladera degradada [L ; en mm]
 P_d = precipitación máxima diaria [L ; en mm]
 PIMP = disponibilidad hídrica (= volumen de agua infiltrado) en el área de impluvio [$L^3/L^2 = L$; usualmente: mm]
 P_m = PM = precipitación mensual [L ; en mm]
 PR = umbral de escorrentía del área de recepción [L ; en mm]
 PROM = disponibilidad hídrica promedio (= infiltración media) en la unidad sistematizada (= en la ladera) [L ; en mm]
 P_{v1} Y P_{v2} = precipitaciones virtuales equivalentes [L ; en mm]
 P_o = umbral de escorrentía [L ; en mm]
 PO = umbral de escorrentía medio de la unidad sistematizada sin considerar el efecto del alcorque [L ; en mm]
 P1 = precipitación mínima (= umbral de escorrentía del área de impluvio) [L ; en mm]
 P2 = precipitación límite (= umbral de escorrentía de la unidad sistematizada considerando el efecto alcorque) [L ; en mm]
 P3 = precipitación máxima que puede ser evacuada por la sistematización secundaria [L ; en mm]
 P5 = precipitación total caída durante los cinco días previos al aguacero a analizar [L ; en mm]
 $Q_e(t)$ = caudal de entrada al microembalse [L^3/T]
 $Q_s(t) = F(h)$ = caudal de salida fuera del microembalse [L^3/T]
 S = S(y) = superficie anegada en el área de recepción [L^2 ; en m^2]
 $S_1 = S1$ = superficie correspondiente al área de impluvio [L^2 ; en m^2]
 $S_2 = S2$ = superficie del área de recepción [L^2 ; en m^2]
 t = tiempo [T ; generalmente y en nuestro caso: min, h]
 $t_f = TF$ = tiempo de conclusión = duración de la infiltración en el área colectora [T ; en min]
 $t_i = TI$ = tiempo de encharcamiento del área de impluvio [T ; en min]
 tif = TIF = tiempo final de vaciado [T ; en min]
 $t_l = TL$ = tiempo límite [T ; en min]
 $t_{m\acute{a}x}$ = tiempo máximo en el que el agua anega el área de recepción una vez finalizado el chubasco [T ; en min]

$t_r = TR =$ tiempo de encharcamiento del área de recepción [T ; en min]
 $t_s =$ valor auxiliar para la obtención del tiempo de encharcamiento en el área de impluvio [T ; en min]
 $t_t =$ valor auxiliar para la obtención del tiempo de encharcamiento en el área receptora [T ; en min]
 $T_{tv} = TTV =$ tiempo total de vertido [T ; en min]
 $t_v = TV =$ tiempo final de rebosadura [T ; en min]
 $V(t) =$ volumen de agua almacenado en el microembalse en un instante dado (t) [L³ ; usualmente: l]
 $V_f = V(D) =$ volumen de agua acumulado en el microembalse al final del chubasco [L³ ; en l]
 $V_i = V(0) =$ volumen de agua existente en el microembalse al comienzo de la lluvia [L³ ; en l]
 $v_i(t) =$ velocidad de infiltración en el área de impluvio [L/T ; en mm/h]
 $v_r(t) =$ velocidad de infiltración en el área de recepción [L/T ; en mm/h]
 $y = y(t) =$ altura de la lámina de agua en el microembalse en el instante t [L ; en general: mm]
 $y_f = y(D) =$ calado del agua en el microembalse al final del aguacero [L ; en mm]
 $y_i =$ calado del agua en el microembalse al comienzo del aguacero [L ; usualmente: 0 mm]
 $Y_{máx} =$ calado máximo del agua en el microembalse a régimen estacionario [L ; en mm]
 $Y_r =$ calado 'final' (nada más concluir el aguacero o una vez finalizada la rebosadura, es decir que: $y_r \leq H$) [L ; mm]
 $YU = ALTU =$ altura mínima de las represas para que no haya vertido fuera de la unidad sistematizada [L ; en mm]
 $\alpha =$ ALFA = exponente de disminución de la capacidad de infiltración en el área de impluvio [T⁻¹ ; suele darse en min⁻¹]
 $\beta =$ BETA = exponente de disminución de la capacidad de infiltración en el área colectora [T⁻¹ ; suele darse en min⁻¹]
 $\Delta E_s =$ escorrentía superficial generada por el aguacero en la ladera degradada (sin sistematizar) [L ; en mm]

$\Delta t = t_i - t_s =$ cambio cronológico de la ley de capacidad de infiltración en el área de impluvio [T ; en min]
 $\sigma t = t_r - t_t =$ cambio cronológico de la ley de capacidad de infiltración en el área de recepción [T ; en min]

Conclusiones

La principal aportación científica de este trabajo estriba en el cambio de mentalidad que sugiere y desarrolla: Para la Hidrología de zonas áridas lo importante no es el agua que escapa por escorrentía superficial y genera los caudales punta en los torrentes y ramblas sino el agua que se infiltra, el agua que queda en la ladera y posibilita la vida en la misma. Los efectos devastadores los provoca la escorrentía superficial y - tal vez por eso - centremos nuestra atención en dicha componente aparatosa. Pero la raíz del problema a la vez que la solución para mitigar las riadas y disminuir la erosión hídrica está en la infiltración, componente mucho más imperceptible y difusa que regula los demás procesos.

Lluvia neta y escorrentía superficial no deben ser sinónimos si se quiere luchar contra la desertificación. Mediante trampas de agua del tamaño apropiado y en cantidad suficiente se puede conseguir retener una buena parte del agua de lluvia en el lugar donde cae para beneficio del repoblado. Lo más importante en la preparación del suelo para una repoblación en zonas áridas es la retención e infiltración de la lluvia. Hay que centrar los esfuerzos y el ingenio en diseñar la sistematización primaria. En último término y como mal menor por si las precipitaciones resultan excesivas, hay que prever la evacuación de los excedentes de forma ordenada a través de una sistematización secundaria. Pero la labor fundamental debe consistir en retener las lluvias en el lugar donde caen. De esta manera se asegura el éxito de la reforestación a la vez que se controla la erosión y se atenúan los caudales de avenida.

Este planteamiento no es en modo alguno nuevo dentro del sector forestal: Las repoblaciones de zonas áridas siempre han perseguido este propósito. A modo de ejemplo basta con recordar las realizadas en Sierra Espuña a finales del siglo pasado mediante el laborioso y eficaz sistema de los "diques de reconstitución".

Sin embargo, entre los hidrólogos se ha prestado muy poca atención a este enfoque. Nuestra formación eminentemente hidráulica nos suele llevar a los cauces en donde abordamos y resolvemos problemas mucho más complejos de Hidráulica Fluvial o Torrencial. Esta es la única razón que he sabido encontrar para explicar el hecho sorprendente de que nos hayamos olvidado casi por completo y hasta la fecha de una cuestión tan elemental e importante como la que se aborda en este trabajo.

Así, el problema ha habido que plantearlo desde el comienzo. Una buena prueba de ello la encontramos en la necesidad de proponer un nuevo balance hídrico puntual que se centre en el proceso de infiltración en vez de en la escorrentía. Con posterioridad, hemos introducido el concepto de unidad sistematizada, porción autónoma de terreno que persigue endorreísmo para lo cual acumula la lluvia neta en microembalses de infiltración sin que se produzcan desbordamientos.

La descripción de las etapas de funcionamiento de un microembalse termina por realzar las diferencias entre los planteamientos clásicos de la Hidrología y los contemplados en este trabajo: en nuestro estudio destacamos los tiempos previos al comienzo de la rebosadura así como el tiempo total de infiltración mientras que nos olvidamos de los tiempos característicos del hidrograma a excepción del tiempo base al que denominamos tiempo de rebosamiento y que tratamos de anular con las trampas de agua.

Para cuantificar el volumen que se infiltra en una ladera preparada para la repoblación, particularizamos el balance hídrico puntual propuesto a las dos zonas en que cabe dividir a las unidades surgidas de la preparación del suelo: áreas de impluvio (= donantes de escorrentía) y áreas de recepción. La media ponderada según superficies nos da la disponibilidad hídrica conseguida, cifra que comparamos con la infiltración que provoca el mismo aguacero en la ladera degradada sin intervención.

Estos planteamientos constituyen las bases del modelo hidrológico propuesto. En un desarrollo posterior se particularizan para la ecuación de infiltración de Horton y para

el método del número de curva. Como producto final se informatizan las dos aplicaciones mencionadas. Los programas resultantes [HYDNUM y MODIPE] permiten simular el comportamiento de cualquier unidad proyectada (sean microcuencas, acaballonados, aterrazados, etc.) en lo que constituye una primera herramienta de trabajo para el dimensionado de parcelaciones 'endorreicas'.

Proponer teorías y propagar modelos por doquier sin otro objetivo que lograr un buen curriculum se ha convertido últimamente en el deporte favorito de muchos investigadores. Dentro de esa "modelitis aguda" que padece la Hidrología actual, este trabajo puede parecer un magnífico exponente. Pero pienso que no es éste el caso ya que el problema que planteamos y resolvemos no ha sido abordado hasta la fecha. Ciertamente es que de momento el modelo presenta el inconveniente de no estar calibrado. Sin duda es ésta la principal laguna del trabajo que presento como Tesis Doctoral. Soy consciente de ello. Como broma puedo aducir que las lagunas son muy útiles en zonas áridas, pero en serio he de reconocer la mencionada carencia con todas sus implicaciones. Sirva en descargo el hecho de que en este caso los planteamientos son bastante novedosos y que las soluciones propuestas inciden de manera directa en un problema acuciante para España: la desertificación por aridez edáfica, razón por la que urge propagar tales conocimientos sin más tardanza.

¡Al ser una teoría nueva queda todavía tanto por hacer! Calibrar los dos modelos (HYDNUM y MODIPE) debe ser la tarea prioritaria, pero habrá que desarrollar los programas mejor, habrá que dotarlos de nuevas utilidades, habrá que particularizar las ecuaciones generales a otros modelos de infiltración, habrá que desarrollar algoritmos de ajuste y optimización, y - por supuesto - habrá que engarzar esta teoría con balances hídricos del suelo que nos aproximen al concepto habitual de disponibilidad hídrica. De hecho, esta tesis puede ser tachada de somera y superficial con toda justicia puesto que no entra en profundidades edáficas. Pero quede también esta importante cuestión para más adelante.

No quisiera concluir este trabajo sin disculpar la sencillez de mis planteamientos. Cuando en la literatura científica el mundo bulle de gozo por los continuos hallazgos y aplicaciones de los sistemas de información geográfica, de las imágenes desde satélite, de las ordenaciones del territorio, de los planes hidrológicos nacionales ...; cuando el mundo entero se congratula al comprobar que el universo está en expansión aparece este estudio contra corriente y se ocupa de algo tan insignificante como el punto.

A primera vista parece un tema de escaso interés pero en modo alguno es así. Lo minúsculo siempre tendrá importancia en este mundo. El punto es esencial como parte integrante del todo: así lo es la espora como parte del hongo, el árbol como parte del bosque, el individuo como parte de la sociedad y - si se me permite la licencia - esta tesis como parte de la Ciencia.

Mi trabajo llega a su fin. Tal vez por ello me invadan ahora infinidad de dudas e incertidumbres. Pero ya es tarde para modificar lo escrito. La suerte está echada. No todo será cierto ni tampoco falso: habrá algunos argumentos incuestionables pero ciertas ideas sobrarán y otras - en cambio - se echarán en falta. Pero ya es hora de finalizar lo comenzado.

Sí, es cierto, este ansiado instante ha llegado. Nada queda ya por argüir: ninguna idea, ninguna razón, tan sólo sentimientos y recuerdos de la labor realizada. El esfuerzo hasta llegar aquí ha sido arduo, largo, incierto y - ¿por qué no reconocerlo? - bastante árido. ¡Cuántas horas delante de una pantalla de ordenador, cuántos días de ratón de biblioteca, cuántos meses de reflexión confinado en laberintos matemáticos y de programación sin encontrar la ansiada salida...! Y una vez vez superados los entresijos en los que me adentré por mor al arte hidrológico, tan sólo deseo que mi esfuerzo no haya sido estéril. Si contribuyese a comprender mejor los procesos de desertificación o si orientase a repoblar de una forma más certera o si ayudase a reducir el número de marras me sentiría altamente gratificado. Pero la verdad es que con mucho menos me doy por satisfecho; que también me sentiré

sobradamente recompensado si el modelo suscita duras críticas y argumentadas correcciones.

En la impaciente espera quedo, amigo lector. Ahora eres tú quien tiene la palabra.

Bibliografía

- △ Abo-Ghoobar, H.M. y Kay, M.G.(1990): Predicting runoff from a micro-catchment; Journal of Agricultural Engineering Research, 45; p. 101 - 105
- △ Aguiló Bonnin, J.(1982): Circulación de caudales progresivamente crecientes; 31 p.;ed. Servicio de Publicaciones del MOPU (Madrid)
- △ Ahmad, S.(1987): Micro-catchment farming systems for low rainfall (Barani) areas of Pakistan; Journal of Agricultural Research, 25; p. 111 - 119
- △ Al-Ghariani, S.A.(1987): Supplementary irrigation and water harvesting systems in Libya; en "Consultation on Supplementary Irrigation"; p. 76 - 81; ed. FAO (Roma)
- △ Allué Andrade, J.L.(1990): Atlas fitoclimático de España. Taxonomías; ed. M.A.P.A. (Madrid)
- ▷ Aparicio Mijares, F.J.(1989): Fundamentos de Hidrología de Superficie; p. 183 - 193; ed. Limusa (México)
- ▷ Aron, G.; Miller, A.C. y Lakatos, D.F.(1977): Infiltration formula based on SCS curve number; Journal of the Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 103; p. 419 - 427
- △ Aschmann, H.(1977): Historical development of agriculture in semi-arid regions of winter precipitation; Actas del International Symposium on Rainfed Agriculture in Semi-arid Regions; p. 87 - 111
- △ Ayuso, J.L. y Giráldez, J.V.(1982): Un modelo hidrológico de las terrazas para conservación de suelos; ed. I.N.I.A. (M.A.P.A., Madrid)
- △ Ayuso, J.L. (1990): Circulación de flujos. Métodos de cálculo

usuales en el diseño de canales y embalses en cuencas pequeñas; p. 1 - 17; monografía n^o 179; ed. Servicio de Publicaciones de la U. de Córdoba

Δ Barrow, C.J.(1988): The present position and future development of rain-fed agriculture in the Tropics; Outlook on Agriculture, 17; p. 112 - 119

▷ Belmans, C.; Wesseling, J.G. y Feddes, R.A.(1983): Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE; Journal of Hydrology, 63; p. 271 - 286

▷ Ben-Asher, J. y Warrick, W.(1987): Effect of variations in soil properties and precipitation on microcatchment water balance; Agricultural Water Management, 12; p. 177 - 194

Δ Ben-Asher, J. y Berliner, P.R.(1994): Runoff irrigation; en "Management of water use in agriculture"; p. 126 - 154; ed. Springer Verlag (Berlin)

Δ Ben-Hur, M.(1991): The effects of dispersants, stabilizer and slope length on runoff and water-harvesting farming; Australian Journal of Soil Research, 29; 553 - 563

Δ Bistline, R.G.; Linfield, W.M.; Wise, W.B.; Pfeffer, P.E.; Sonnet, P.E. y Piotrowski, E.G.(1987): Reaction of fatty acids with 3,3'-iminobis-propylamine to produce soil hydrophobic agents; Journal of the American Oil Chemists' Society, 64; p.744 - 748

▷ Boers, Th. M.(1994): Rainwater harvesting in arid and semi-arid zones; 127 p.; ed. ILRI Publications (Wageningen)

Δ Boers, T.M. y Ben-Asher, J.(1980): Harvesting water in the desert; en "Annual report 1979"; p. 6 - 23; ed. International Institute for Land Reclamation and Improvement (Wageningen)

▷ Boers, Th. M. y Ben Asher, J.(1982): A review of rainwater harvesting; Agricultural Water Management, 5; p. 145 - 158

- △ Boers, Th. M. ; Zondervan, K. y Ben-Asher, J.(1986): Micro - catchment - water - harvesting (MCWH) for arid zone development; Agricultural Water Management, 12; p. 21 - 39
- ▷ Boers, Th. M. ; de Graaf, M.; Feddes, R.A. y Ben-Asher, J.(1986): A linear regression model combined with a soil water balance model to design micro-catchments for water harvesting in arid zones; Agricultural Water Management, 11; p. 187 - 206
- △ Boers, Th. M. y Warrick, A. M.(1987): Effect of variations in soil properties and precipitation on microcatchment water balance; Agricultural Water Management, 12; p. 177 - 194
- ▷ Bower, H.(1966): Rapid field measurement of air-entry value and hydraulic conductivity of soil as significant parameters in flow system analysis; Water Resources Research, 2: p. 729 - 738
- △ Bruins, H.J.; Evenari, M. y Rogel, A.(): Run-off farming management and climate; en "Progress in desert research"; p. 3 - 14; ed. Ben-Gurion University (Beer-Sheva, Israel)
- ▷ Cadot, P.D. (1989): Development of a model for design of water harvesting systems in small scale rainfed agriculture; 155 p.; Tesis Doctoral; ed. University Microfilms International (Michigan)
- △ Cadot, P.D.; Slack, D.C. y Dutt, G.R. (1989): A design model for small scale water harvesting systems; 17 p.; ed. ASAE (St. Joseph)
- △ Chapman, R.W.(1978): The evidence for prehistoric water control in south-east Spain; Journal of Arid Environments, 1; p. 261 - 274
- ▷ Chow, V.T.; Maidment, D.R. y Mays, L.W.(1988): Applied hydrology; p. 147 - 155; ed. McGraw-Hill (New York)
- ▷ Chu, S.T.(1978): Infiltration during an unsteady rain; Water Resources Research, 14; p. 461 - 466

- △ Cohen, O.P.; Evenari, M.; Shanan, L. y Tadmor, N.H.(1968): 'Runoff-farming' in the desert. II. Moisture use by young apricot and peach trees; *Agronomy Journal*, 60; p. 33 - 38
- △ Critchley, W.(1990): Cómo África captura la lluvia; *Ceres*, 125; p. 41 - 45
- ▷ Critchley, W.; Siegert, K.; Chapman, C. y Finkel, M.(1991): *Water harvesting. A manual for the design and construction of water harvesting schemes for plant production*; 133 p.; ed. FAO (Roma)
- ▷ Critchley, W.; Reij, C. y Seznec, A.(1992): *Water harvesting for plant production. Volume II: case studies and conclusions for Sub-Saharan Africa*; 134 p.; ed. The World Bank (Washington)
- △ Dent, D. y Murtland, R.(1990): Land evaluation for afforestation in a semi-arid environment: the Montane Plains of the Central Highlands of North Yemen; *Catena*, 17; p. 509 - 523
- △ Diskin, M.H.; Buras, N. y Zamir, S.(1973): Application of a simple hydrologic model for rainfall-runoff relations of the Dalton watershed; *Water Resources Research*, 9; p. 927 - 936
- ▷ Dunne, T. y Leopold, L.B.(1978): *Water in environmental planning*; p. 291 - 298; ed. W.H. Freeman and Co. (New York)
- △ Ehrler, W.L.; Fink, D.H. y Mitchell, S.T.(1970): Growth and yield of jojoba plants in native stands using runoff-collecting microcatchments; *Agronomy Journal*, 70; p. 1005 - 1009
- ▷ Elías Castillo, F. y Ruiz Beltrán, J.(1979): *Precipitaciones máximas en España. Estimaciones basadas en métodos estadísticos*; p. 7 - 38; ed. I.C.O.N.A. (Madrid)
- △ Evenari, M. (1982): *Ökologisch-landwirtschaftliche Forschungen im Negev*; 214 p.; ed. Technische Hochschule Darmstadt

△ Evenari, M.(1987): Und die Wüste trage Frucht. Ein Lebensbericht; 338 p.; ed. Bleicher Verlag (Gerlingen)

△ Evenari, M.; Shanan, L. y Tadmor, N.H.(1963): Runoff-farming in the Negev desert of Israel. Progress Report on the Avdat and Shivta Farm Projects for the years 1958 - 1962; ed. The National and University Institute of Agriculture (Rehovot, Israel)

△ Evenari, M.; Shanan, L. y Tadmor, N.H.(1964): Runoff-farming in the Negev desert of Israel. Progress Report on the Avdat and Shivta Farm Projects 1962/3 season; ed. The National and University Institute of Agriculture (Rehovot, Israel)

△ Evenari, M.; Shanan, L. y Tadmor, N.H.(1968): 'Runoff-farming' in the desert. I. Experimental layout; Agronomy Journal, 60; p. 29 - 32

△ Evett, S.R. y Dutt, G.R.(1985): Effect of slope and rainfall intensity on erosion from sodium dispersed, compacted earth microcatchments; Journal - Soil Science Society of America, 49; p. 202 - 206

▷ Feddes, R.A.; Kowalik, P.J. y Zaradny, H.(1978): Simulation of field water use and crop yield; 189 págs; Wageningen

△ Ferguson, B.K.(1987): Urban stormwater harvesting: applications and hydraulic design; Journal of Environmental Management, 25; p. 71 - 79

△ Fernández Yuste, J.A. (1989): Actuaciones en la cuenca; medidas estructurales en terrenos forestales; en "Estabilización de cauces torrenciales"; 12 págs.; ed. E.U. de Ingeniería Técnica Forestal de Madrid

▷ Fernández Yuste, J.A. y Roldán Soriano, M.(1993): Criterios para la caracterización hidrológica de los trabajos de preparación del suelo para la repoblación; Actas del Congreso Forestal

Español; tomo III; pp. 63 -68

► Fernández Yuste, J.A. y Roldán Soriano, M.(1994): Técnicas de conservación de suelos en el ámbito forestal; 39 págs.; en "Seminario sobre erosión y degradación de suelos agrícolas y forestales. Contribución a la lucha contra la desertificación"; C.S.I.C., Madrid (en prensa)

Δ Fink, D.H.(1970): Water repellency and infiltration resistance of organic-film-coated soils; Soil Science Society Amer. Proc., 34; p. 189 - 194

Δ Fink, D.H.(1976): Laboratory testing of water-repellent soil treatments for water harvesting; Soil Science Society of America, 40; p. 562 - 566

Δ Fink, D.H.(1982): Residual-wax soil treatments for water harvesting; Soil Science Society of America J., 46; p.1077 - 1080

Δ Fink, D.H. y Ehrler, W.L.(1983): Runoff farming for growing Christmas trees; Soil Science Society of America J., 47; p. 983 - 987

Δ Fink, D.H. y Ehrler, W.L.(1986): Christmas tree production using the runoff farming system; HortScience, 21; p. 459 - 461

► Finkel, M. et al.(1985): Turkana water harvesting manual; 125 p.; ed. M. Finkel (Norad)

Δ Fok, Yu-Si (1992): Rainwater harvesting and IRCSA development; A.S.A.E. paper n° 92-8006; 8 p.

Δ Frasier, G.W.(1975): Water harvesting: a source of livestock water; Journal of Range Management, 28; 429 - 434

Δ Frasier, G.W.(1988): Technical, economic and social considerations of water harvesting and runoff farming; en "Arid lands: today and tomorrow"; p. 905 - 918; ed. Westview Press Inc.

(Boulder)

△ Gale, S.J. y Hunt, C.O. (1986): The hydrological characteristics of a floodwater farming system; *Applied Hydrology*, 6; p. 33 - 42

△ Gavande, S.A. (1986): Watershed management with an emphasis on water harvesting, erosion and torrent control techniques; 30 p.; ed. FAO (Roma)

▷ García Cañada, R. (1924): Acción de los montes en la formación y precipitación de los meteoros acuosos y en la regularización de las corrientes de agua; en "Curso de Conferencias dedicado a la Producción del Campo Aragonés"; p. 123 - 162; ed. Academia de Ciencias Exactas, Físico-Químicas y Naturales de Zaragoza

△ García Nájera, J.M. (1954): Pendiente máxima admisible en tierras de cultivo y cálculo de las terrazas intermitentes con desagüe para la conservación del suelo (banquetas de infiltración); 29 págs., ed. IFIE (Madrid)

△ Geddes, H.J. (1963): Water harvesting; artículo presentado en el "National Symposium on Water Resources", Australian Academy of Science (Canberra)

△ Gielen, H. (1990): Water harvesting for trees. The practice of microbasins in Tahoua, Niger; *AT Source*, 18; p. 14 - 17

△ Gilbertson, D.D. (1986): Runoff (floodwater) farming and rural water supply in arid lands; *Applied Geography*, 6; p. 5 - 11

▷ Giráldez, J.V.; Ayuso, J.L. et al (1988): Water harvesting strategies in the semiarid climate of southeastern Spain; *Agricultural Water Management*, 14; p. 253 - 263

▷ Giráldez, J.V.; Ayuso, J.L. et al (1989): Recursos hidráulicos alternativos. Algunos remedios para controlar la desertización en la cuenca mediterránea; en "Degradación de zonas áridas en el entorno Mediterráneo" ; p. 91 - 104; ed. MOPU (Madrid)

- △ Guerra, L.C.; Watson, P.G. y Bhuiyan, S.I.(1990): Hydrological analysis of farm reservoirs in rainfed rice areas; *Agricultural Water Management*, 17; p. 351 - 366
- △ Gupta, J.P. y Muthana, K.D.(1985): Effect of integrated moisture conservation technology on the early growth and establishment of *Acacia tortilis* in the Indian Desert; *The Indian Forester*, 111; p. 477 - 485
- △ Gutiérrez Mora, A.(1987): Diseño de un implemento de tracción animal para formar microcuencas de captación de lluvias; 89 p.; Tesis Doctoral (no publicada) de la U. Autónoma de Chapingo (México)
- △ Hadwen, P.(1987): Rain-water harvesting: an overview; en *Natural Resources. Water Series*, n° 22 (Unesco); p. 307 - 313
- ▷ Haan, C.T.; Johnson, H.P. y Brakensiek, D.L. (1982): Hydrologic modeling of small watersheds; p. 208 - 209; ed. American Society of Agricultural Engineers (St. Joseph)
- ▷ Hari Krishna, J.(1989): Modelling the effects of tied-ridging on water conservation and crop yields; *Agricultural Water Management*, 16; p. 87 - 95
- ▷ Hjelmfelt, A.T. (1979): Curve number procedure as infiltration method; *Journal of the Hydraulics Division; Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 106; p. 1107 - 1111
- ▷ Horton, R.E.(1940): An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity; *Soil Science Society of America Proceedings*, 5; p. 399 - 417
- ▷ Huggins, L.F.(1982): Surface runoff, storage and routing; en "Hydrologic modeling of small watersheds"; p. 169 - 225; ed. American Society of Agricultural Engineers (St. Joseph, Michigan)

- Δ Illangasekare, T.H. y Morel-Seytoux, H.J.(1984): Design of a physically-based distributed parameter model for arid-zone surface-groundwater management; *Journal of Hydrology*, 74; p.213 - 232
- Δ Illangasekare, T.H.; Morel-Seytoux, H.J. y Koval, E.J. (1984): Application of a physically based distributed parameter model for arid-zone surface-groundwater management; *Journal of Hydrology*, 74; p. 233 - 257
- Δ Ishaq, A.M. y Khararjian, H.A.(1988): Stormwater harvesting in the urban watersheds of arid zones; *Water Resources Bulletin*, 24; p. 1227 - 1235
- Δ Jaradat, A.A.(1987): Farming systems in Jordan. Rainfed, water harvesting and supplementary irrigation; en "Consultation on Supplementary Irrigation"; p.65 - 75; ed. FAO (Roma)
- Δ Kammer, D. y Tin Win, U.(1989): Rainwater harvesting in Somalia: preliminary results of observations at four rural reservoirs; 44 p.; ed. National Water Centre (Mogadishu)
- Δ Karnieli, A.; Ben-Asher, J.; Dodi, A.; Issar, A. y Oron,G.(1988): An empirical approach for predicting runoff yield under desert conditions; *Agricultural Water Management*, 14; p. 243 - 252
- Δ Kemper, W.D. y Noonan, L.(1970): Runoff as affected by salt treatments and soil texture; *Soil Science Society of America J.*, 34; p. 126 - 130
- Δ Kowsar, A.(1982): Water harvesting for afforestation: III. Dependence of tree growth on amount and distribution of precipitation; *Soil Science Society of America*, 46; p. 802 - 807
- ▷ Kowsar, A.; Mehdizadeh, P.; Vaziri, E. y Boersma, L.(1978): Water harvesting for afforestation: II. Survival and growth of trees; *Soil Science Society of America J.*, 42; p. 650 - 657

- ▶ Kutilek, M.(1980): Constant rainfall infiltration; *Journal of Hydrology*, 45; p. 289 - 303
- Δ Laryea, K.B.(1992): Rainfed agriculture: water harvesting and soil water conservation; *Outlook on Agriculture*, 21; p. 271 - 277
- Δ Lee, M.D.(1987): Modelling reveals runoff secrets; *World Water*, 10; p. 37 - 40
- Δ Lee, M.D.(1988): The development of a distributed computer simulation model of a reconstructed ancient water-harvesting system, Avdat, Israel; en "Arid lands: today and tomorrow"; p. 919 - 934; ed. Westview Prees Inc. (Boulder, Colorado)
- Δ Li, C. y Shen, J.(1994): Similaririty analysis and scaling: an application to soil infiltration properties; *Hydrological Processes*, 8; p. 543 - 550
- ▶ Llobet, S.(1958): Utilización del suelo y economía del agua en la región semiárida de Huerca-Overa (Almería); *Estudios Geográficos* n° 70; p. 5 - 21
- Δ Lopes, J.E.G.; Braga, B.P.F. y Conejo, J.G.L.(1982): SNAP - a simplified hydrologic model; en 'Applied modeling in catchment hydrology'; p. 167 - 176; ed. BookCrafters (Chelsea, Michigan)
- Δ Lövenstein, H.M.; Berliner, P.R. y van Keulen, H.(1991): Runoff agroforestry in arid lands; *Forest Ecology and Management*; 45; p. 59 - 70
- Δ Manrique Menéndez, E.(1992): Informatización de los diagramas de Walter (Gausson) y de la taxonomía fitoclimática de Allué Andrade; *Montes* n° 27; p.62 - 64
- Δ Manrique Menéndez, E.(1993): Informatizaciones 'CLIMOAL'; 96 p.; ed. Fundación Conde del Valle de Salazar (Madrid)

- △ Margeta, J. y Fontane, D.G.(1990): Designing communal rain-harvesting systems by spreadsheet method; International Journal of Water Resources Development, 6; p. 278 - 286
- △ Martínez de Azagra Paredes, A.(1994): Modelo para la estimación de las disponibilidades hídricas en ladera.- I. Fundamentos del modelo; informe inédito para el proyecto LUCDEME (I.C.O.N.A.); 37 págs.
- △ Martínez de Azagra Paredes, A.(1994): Modelo para la estimación de las disponibilidades hídricas en ladera. - Particularización de las ecuaciones generales al modelo de Horton. Programa HYDNUM; informe inédito para el proyecto LUCDEME (I.C.O.N.A.); 65 págs.
- △ Martínez de Azagra Paredes, A.(1995): Modelo para la estimación de las disponibilidades hídricas en ladera. - Particularización de las ecuaciones generales al método de los números de curva. Programa MODIPE; informe inédito para el proyecto LUCDEME (I.C.O.N.A.); 91 págs.
- ▷ McCuen, R.H.(1982): A guide to hydrologic analysis using SCS methods; p. 9 - 18; ed. Prentice-Hall (New Jersey)
- ▷ Mehdizadeh, P.; Kowsar, A.; Vaziri, E. y Boersma, L.(1978): Water harvesting for afforestation: I. Efficiency and life span of asphalt cover; Soil Science Society of America J., 42; p. 644 - 649
- △ 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; p. 126 - 130; ed. Junta de Andalucía
- △ Mizayaki, T.(1993): Water flow in soils; p. 29 - 46 y p.123 - 167; ed. Marcel Dekker, Inc. (New York)
- ▷ Mls, J.(1980): Effective rainfall estimation; Journal of Hydrology, 45; p. 305 - 311

- Montero de Burgos, J.L. y González Rebollar, J.L.(1983): Diagramas bioclimáticos; ed. M.A.P.A. (ICONA)
- Montiel Pinilla, F.(1955): La lucha contra la erosión en la cuenca del río Segura; Montes, p. 349 - 354
- Morin, G.C.A. y Matlock, W.G.(1975): Desert strip farming. Computer simulation of an ancient water harvesting technique; en "Proceedings of the Water Harvesting Symposium"; Phoenix (Arizona)
- Morales Gil, A.(1969): El riego con aguas de avenida en las tierras subáridas; Papeles de Geografía de la Universidad de Murcia, n^o 1; p. 167 - 183
- Namde, N. N.(1987): Simulation of micro catchment water harvesting systems; 140 p.; Tesis Doctoral; ed. University Microfilms International
- Navarro, C.(1968): Problemas agrarios en un sector de clima semiárido: campo de Aguilas; Revista de Geografía, III; p. 5 - 39
- Navarro Garnica, M.(1950 y 1951): Repoblaciones en zonas secas; Montes, 36, 37 y 38; p. 721 - 724, 29 - 32 y 101 - 106
- Oria de Rueda Salguero, J.A. (1995): Comunicación personal
- △ Oron, G.; Ben-Asher, J. e Issar, A.(1983): Economic evaluation of water harvesting in microcatchments; Water Resources Research, 19; p. 1099 - 1105
- △ Oron, G. y Enthoven, G.(1987): Stochastic considerations in optimal design of a microcatchment layout of runoff water harvesting; Water Resources Research, 23; p. 1131 - 1138
- △ Oron, G.; Heaton, P. y Ben-Asher, J.(1989): Design criteria for microcatchment water harvesting with scarce data; en 'Irrigation. Theory and practice'; p. 302 - 316; ed. Pentech Press (London)

- ▶ Pacey, A. y Cullis, A.(1986): Rainwater harvesting. The collection of rainfall and runoff in rural areas; 216 p.; ed. Intermediate Technology Publications (London)
- Δ Perrier, E.R.(1986): Small scale water harvesting schemes: design criteria; 23 p.; ed. ASAE (St. Joseph)
- ▶ Peschke, G. y Kutilek, M.(1982): Infiltration model in simulated hydrographs; Journal of Hydrology, 56; p. 369 -379
- ▶ Ponce, V.M.(1989): Engineering hydrology. Principles and practices; p. 155 - 167; ed. Prentice Hall (Englewood Cliffs, New Jersey)
- Δ Ponce Meneses, P.S.(1987): Producción de forraje y grano de maíz bajo técnicas de captación de agua de lluvia y de conservación de humedad edáfica en Tizayuca (Hidalgo, México); 109 p.; Tesis Doctoral (no publicada) de la U. Autónoma de Chapingo (México)
- Δ Rawitz, E. y Hillel, D.(1971): A method for characterizing the runoff potential of rainfall in water harvesting schemes; Water Resources Research, 7; p. 401 -405
- ▶ Reij, C.; Mulder, P. y Begemann, L.(1988): Water harvesting for plant production. Volume I: A comprehensive review of the literature; 123 p.; ed. The World Bank (Washington)
- Δ Rees, D.J.; Qureshi, Z.A.; Mehmood, S. y Raza, S.H.(1991): Catchment basin water harvesting as a means of improving the productivity of rain-fed land in upland Balochistan; Journal of Agricultural Science; 116; p. 95 - 103
- ▶ Revilla Narváez, J.(1980): El 'alumbrado' para acumulación de agua en cultivos leñosos de secano; Hojas Divulgadoras, n° 19/80; ed. Ministerio de Agricultura (Madrid)

△ Richmond, G.S.; Wang, K.M. y Stern, W.R.(1990): Modifying a water balance program (WATBAL) to test the effectiveness of reclamation measures on degraded rangeland by chisel ploughing and waterponding; Agriculture, Ecosystems and Environment, 32; p. 1 - 12

▷ Río San José, J. del; Fernández de Villarán, R. y Martínez de Azagra, A.(1994): Programas básicos de ordenador: III - Ficha hídrica de Thornthwaite y programas auxiliares; Serie Forestal n° 8; ed. Servicio de Publicaciones de la E.U.P.A. (Palencia)

△ Sbeih, Y.H.K.(1990): Effect of water harvesting and polymer (as soil conditioner) treatment on growth performance of non bearing 'Nabali' olive trees in Muwaqqar area; 113 p.; Tesis Doctoral; Universidad de Amman (Jordania)

△ Schiller, E.J. y Latham, B.G.(1987): A comparison of commonly used hydrologic design methods for rainwater collectors; International Journal of Water Resources Development, 3; p. 165 - 170

△ Sengupta, N.(1993): User-friendly irrigation designs; 147 p.; ed. Sage Publications (Nueva Delhi)

▷ Serrada, R.(1993): Apuntes de repoblaciones forestales; p. 215 - 236; ed. Fundación Conde del Valle de Salazar (Madrid)

△ Shah, B.H.(1990): Efficacy of water conservation techniques for the afforestation of watersheds in the scrub zone of Pakistan; Pakistan Journal of Forestry, 40; p. 278 - 286

△ Shanan, L.; Tadmor, N. y Evenari, M.(1958): The ancient desert agriculture of the Negev. II. Utilization of runoff from small watersheds in the Abde (Ovdar) Region; Ktavim, 9; p. 107 - 128

△ Shanan, L.; Tadmor, N.H.; Evenari, M. y Reiniger, P.(1970): Runoff farming in the desert. III. Microcatchments for improvement of desert range; Agronomy Journal, 62; p. 445 - 449

△ Shanan, L.; Tadmor, N.H. y Evenari, M.(1961): The ancient desert agriculture of the Negev. VII. Exploitation of runoff from large watersheds; Israel Journal of Agricultural Research, 11; p. 9 - 31

△ Sheikh, M.I.(1988): New species for afforestation in semi-arid lands; Pakistan Journal of Forestry, 38; p. 249 - 254

△ Siadat, H.(1987): Potential of supplementary irrigation in Iran; en "Consultation and Supplementary Irrigation"; p.57 - 60; ed. FAO (Roma)

▶ Simón Navarrete, E. de (1989): Actuaciones en la cuenca; medidas biológicas; en "Estabilización de cauces torrenciales"; 55 págs.; ed. E.U. de Ingeniería Técnica Forestal de Madrid

△ Simón Navarrete, E. de (1990): Restauración de la vegetación en cuencas mediterráneas; repoblaciones en zonas áridas; Ecología, fuera de serie n^o 1; p.401 - 427; ICONA (Madrid)

△ Simón Navarrete, E. de (1992): Repoblaciones forestales en áreas mediterráneas: Técnicas de restauración; en "Curso de restauración de cuencas mediterráneas degradadas"; 36 p.; no publicado

△ Simón Navarrete, E. de; García Rodríguez, J.L. y Robredo Sánchez, J.C.(1993): Evaluación temporal de los beneficios indirectos derivados de las restauraciones hidrológico-forestales en zonas semiáridas; Actas del Congreso Forestal Español, Tomo III; pp. 51 - 55

▶ Singh, V. P.(1989): Hydrologic systems. Watershed modeling (Vol II) ; p. 35 - 77; p. 185 - 190; ed. Prentice Hall (New Jersey)

▶ Skaggs, R.W.(1982): Infiltration; en "Hydrologic modeling of small watersheds"; p. 121 - 166; ed American Society of Agricultural Engineers (St. Joseph, Michigan)

- △ Snobar, B.A.; Denis, P. y Suwwan, M.A.(1989): A plastic greenhouse for semi-arid agriculture (JAF greenhouse); Dirasat, 15; p. 35 - 45
- ▷ Soriano Lloret, A.(1956): Los aperos y los motores de sangre, en los trabajos de repoblación forestal; Montes, p. 339 - 350 y 413 - 424
- ▷ Tadmor, N.H.; Evenari, M.; Shanan, L. y Hillel, D.(1957): The ancient desert agriculture of the Negev. I. Gravel mounds and gravel strips near Shivta (Sbaita); Ktavim, 8; p. 127 - 151
- △ Tadmor, N.H.; Shanan, L. y Evenari, M.(1960): The ancient desert agriculture of the Negev. VI. The ratio of catchment to cultivated area; Ktavim (Israel Journal of Agricultural Research), 10; p. 193 - 222
- △ Tadmor, N.H.; Evenari, M. y Shanan, L.(1970): Runoff farming in the desert. IV. Survival and yields of perennial range plants; Agronomy Journal, 62; p. 695 - 699
- △ Thames, J.L.(1992): Water harvesting; en "Role of forestry in combating desertification"; p. 234 - 252; conservation guide n° 21; ed. FAO (Roma)
- △ Tsakiris, G.(1991): Micro-catchment water harvesting in semi-arid regions: basic design considerations; Water Resources Management, 5; p. 85 - 92
- △ Udawattage, U.D.S.(1985): The development of micro-catchments in Sri Lanka; Journal of Hydrology, 80; p. 351 - 359
- ▷ Varios (1975): Técnicas de forestación; ed. M.A.P.A. (ICONA)
- ▷ Varios (1983): Diseño de presas pequeñas. Una publicación técnica de recursos hidráulicos; p. 446 - 462; ed. CIA Editorial Continental (México)

▶ Varios (1985): Diseño y construcción de pequeños embalses; Manual técnico n° 2; ed. IRYDA (MAPA; Madrid)

▶ Varios (MOPU, 1987): Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales; p. 25 - 31; ed. M.O.P.U. (Madrid)

▶ Varios (MOPU, 1990): Instrucción 5.2 - IC. Drenaje superficial; p. 20; ed. M.O.P.U. (Madrid)

△ Varios (1989): Water resources development in Asia and the Pacific: Dam safety evaluation and monitoring, water tariffs and rain-water harvesting; p. 101 - 118; Water Resources Series, n° 63; ed. United Nations Publications (Geneve)

△ Varios (1990): Consultation on supplementary irrigation; 120 p.; ed. FAO (Roma)

▶ Verma, S.C.(1982): Modified Horton's infiltration equation; Journal of Hydrology, 58; p. 383 - 388

▶ Vilá Valentí, J. (1961): La lucha contra la sequía en el sureste de España; en Seminario de Geografía (Universidad de Murcia); p. 25 - 44

▶ Villanueva Díaz, J.; Sánchez Cohen, I. y Velasco Molina, H.(1987): Propuesta metodológica para determinar la relación área - siembra - escurrimiento en cultivos de temporal; en "Symposium on strategies for classification and management of native vegetation for food production in arid zones"; p. 201 - 206; Tucson (Arizona)

△ Vivar Sanz, A.; Roldán Soriano, M. y Fernández Yuste, J.A.(1993): Aplicación del modelo de Green-Ampt para infiltrometría de doble anillo con carga variable sobre suelos alterados por labores de preparación para la repoblación; en Actas del XII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo; 9 págs.

▶ Vivar Sanz, A.; Fernández Yuste, J.A. y Roldán Soriano, M.(1994): Efectos sobre la infiltración de las labores de preparación del suelo para la reforestación; en Actas de la III Reunión de Geomorfología en España; p. 173 - 185; ed. Sociedad Española de Geomorfología (Logroño)

△ Yitayew, M. y Fangmeier, D.D.(1985): Reuse system design for border irrigation; Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 111; p. 160 -174

△ Zohar, Y.; Aronson, J.A. y Lovenstein, H.(1988): Cultivation of multipurpose trees in rain water harvesting systems in the arid zone of Israel; Commonwealth Forestry Review, 67; p. 339 - 349

▶ bibliografía citada
△ bibliografía consultada

PROGRAMAS:

HYDNUM.EXE y MODIPE.EXE

(en soporte informático)

