

ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIERIAS AGRARIAS
DE LA UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
INSTITUTO NACIONAL PARA LA CONSERVACION
DE LA NATURALEZA

MODELO PARA LA ESTIMACIÓN
DE LAS DISPONIBILIDADES HÍDRICAS
EN LADERA

I.- Fundamentos del modelo

Andrés Martínez de Azagra

Palencia, septiembre de 1994

MODELO PARA LA ESTIMACION DE LAS DISPONIBILIDADES HIDRICAS EN LADERA

Primera Parte: Fundamentos del modelo

INDICE

1. Introducción	1
2. Funcionamiento de una unidad sistematizada	8
3. Bases e hipótesis del modelo	17
4. Ecuaciones generales	23
5. Bibliografía	36

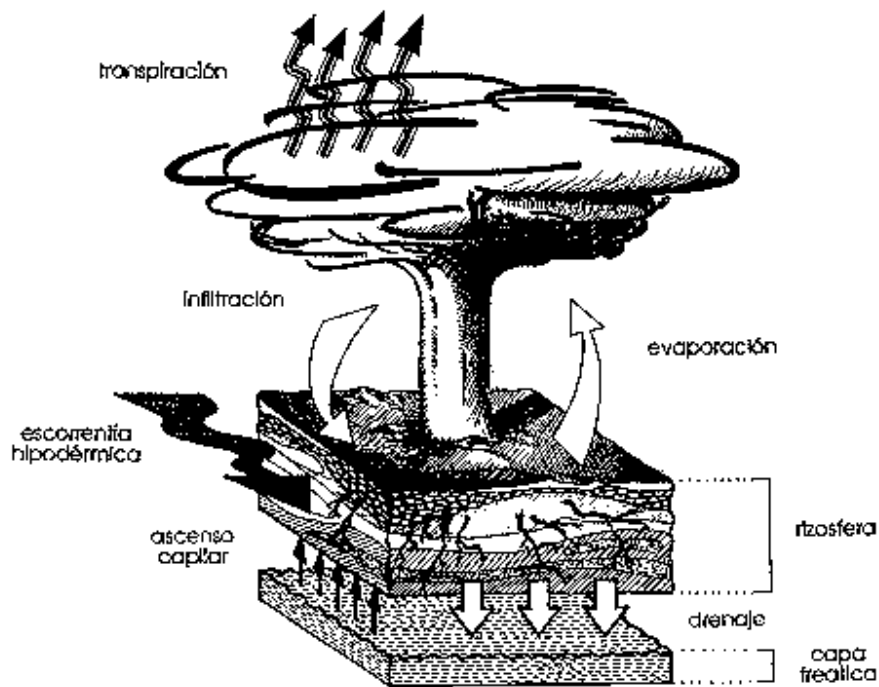
FUNDAMENTOS DEL MODELO

I. 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 mareas 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 están 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

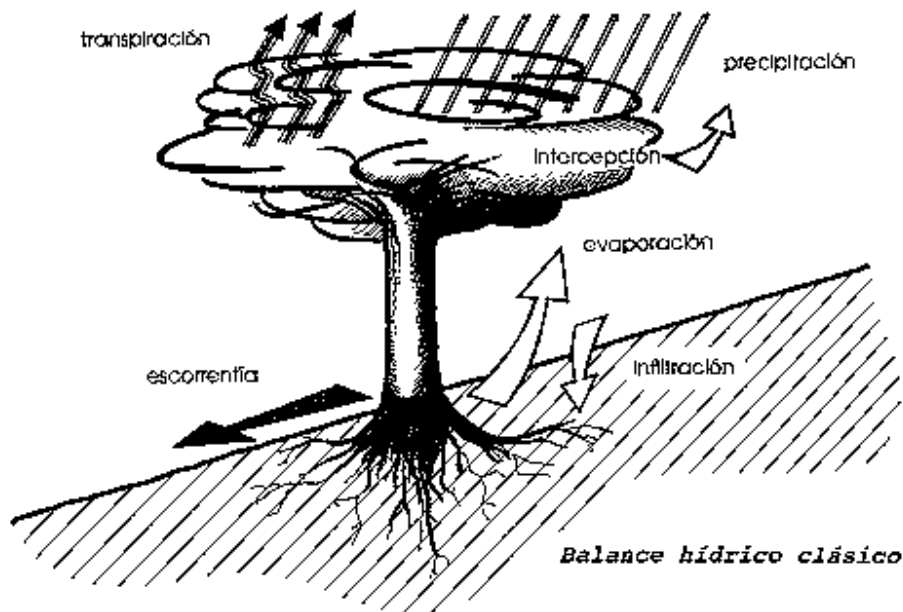
por la escorrentía superficial.

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 = interceptación; 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 interceptación, o por evaporación, o por transpiración, o si se infiltran o si - por el contrario - escurren por la superficie del terreno. Esta visión es

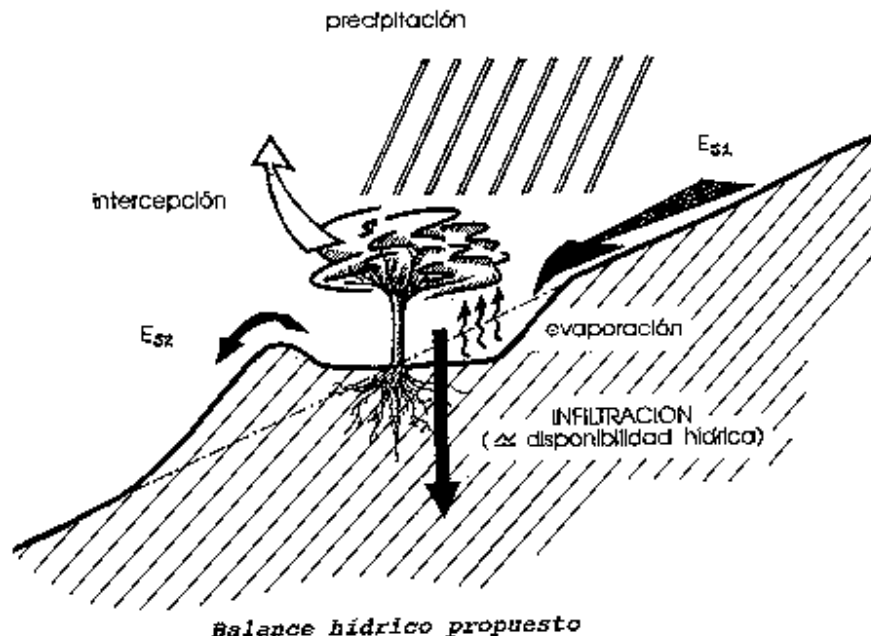
muy intuitiva y sirve como introducción a los componentes del ciclo hidrológico. También permite desarrollar balances hidrológicos globales para una cuenca o cuantificar el valor ponderado que toma alguno de sus componentes, por ejemplo la escorrentía.

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:

$$H = I = P - I_t - E + E_{s1} - E_{s2}$$

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 ladera 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 periodo de encharcamiento tras el aguacero fuese bastante prolongado por encontrarnos en una hondonada y con un suelo impermeable ($E \neq 0$ mm), o si la vegetación es muy tupida y consideramos un aguacero de baja cuantía ($I_t \neq 0$ mm) no podremos hacer tal simplificación.

$$H = I = P + E_{s1} - E_{s2}$$

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 del programa informático que se desarrolla 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 a nosotros, los Ingenieros de Montes, no nos incumbe lo más mínimo la aportación específica de un río. 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, 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.

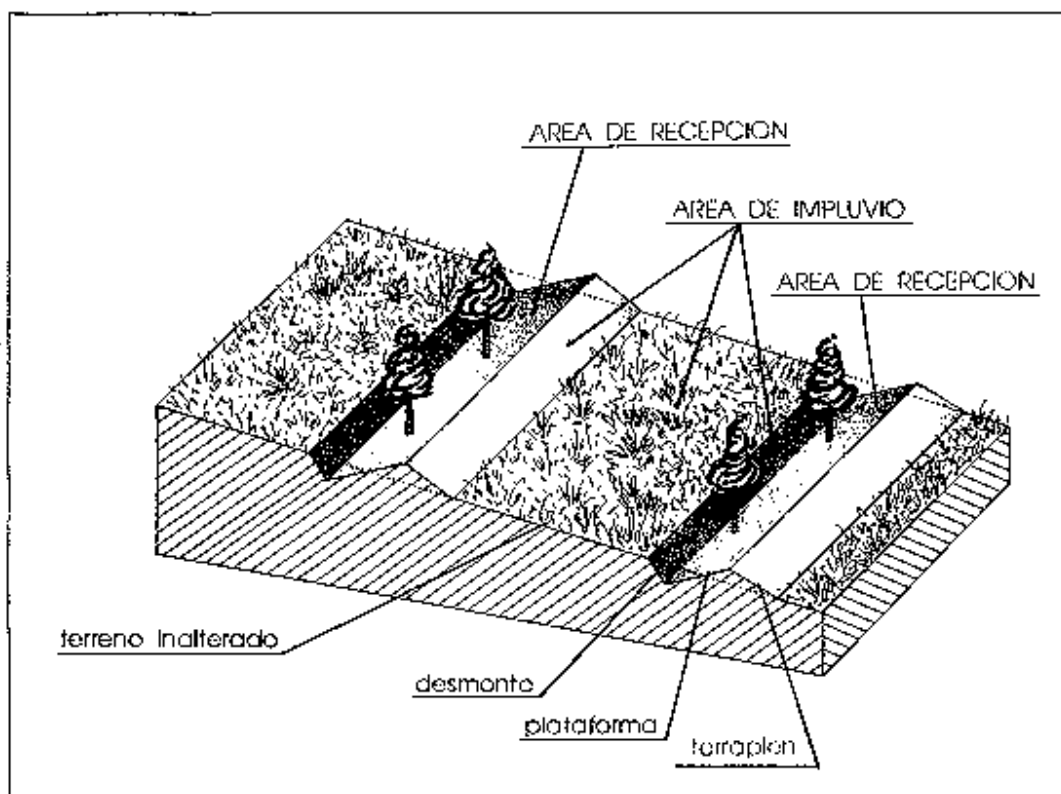
Muchos de los métodos de preparación del suelo para repoblación originan una sistematización primaria. El primer paso para poder analizar su efecto hidrológico consiste en identificar la unidad sistematizada. En el caso de las banquetas con microcuenca la identificación es inmediata: la banqueta se corresponde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

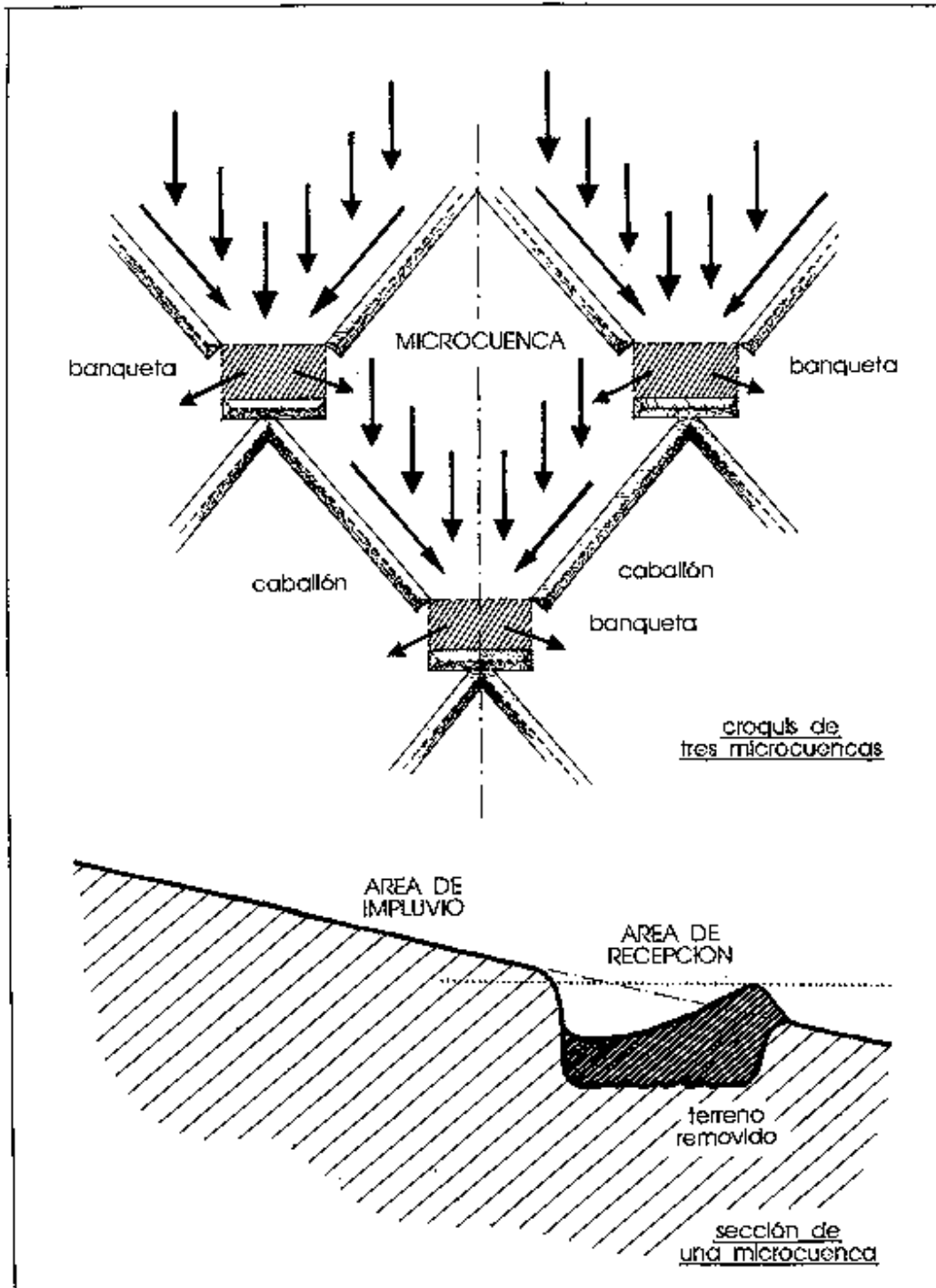
Para otros procedimientos de preparación del suelo la identificación de la unidad sistematizada no resulta tan inmediata. Para el subsolado lineal en curvas de nivel se puede utilizar el mismo criterio que con el acaballonado: la separación entre surcos consecutivos plantados delimita la unidad sistematizada;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

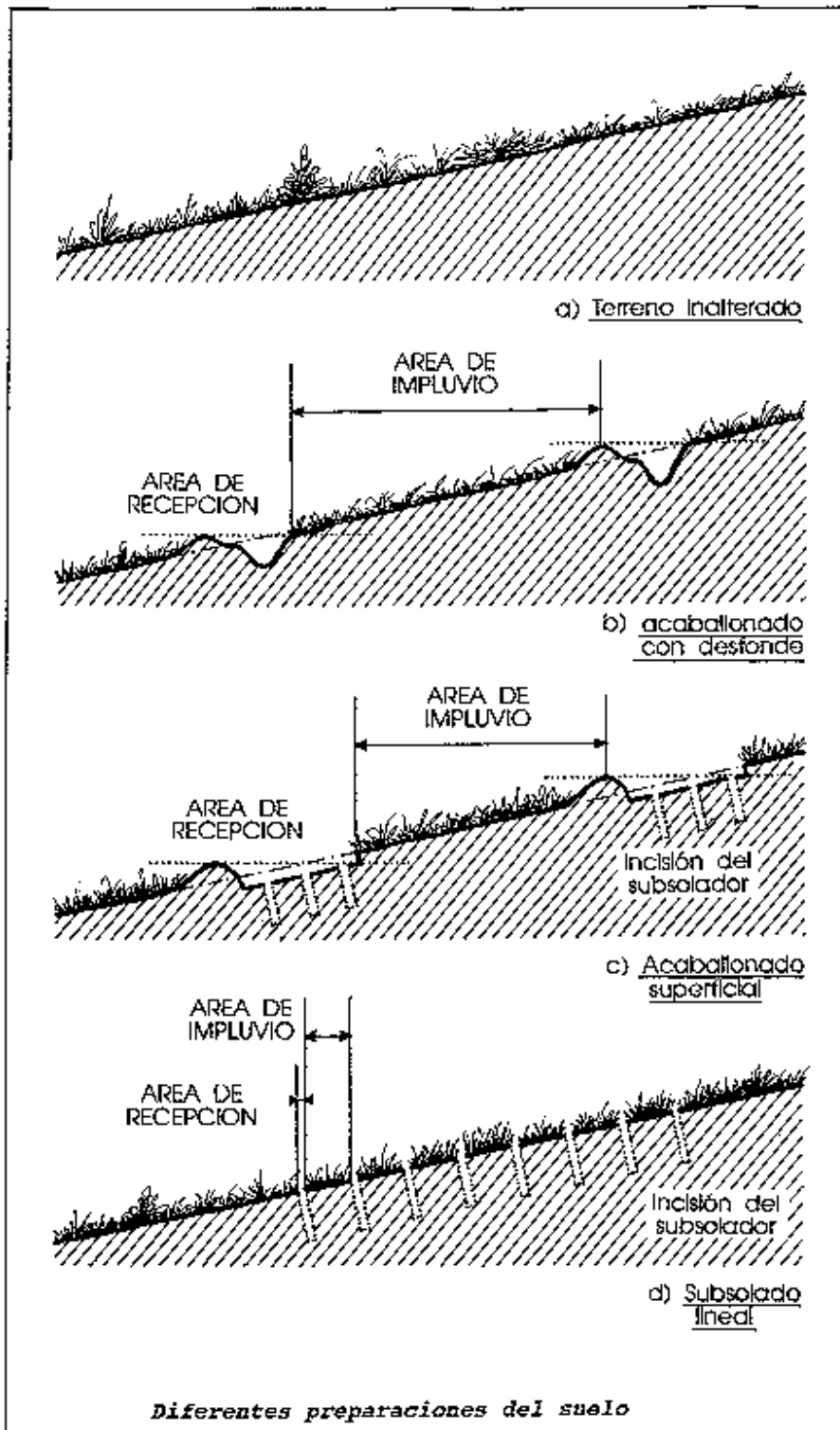
restante es el área de impluvio. El subsolado cruzado en terrenos inclinados define una retícula de forma romboidal. Cada rombo puede ser interpretado como unidad sistematizada en la que el área de recepción se identifica con el vértice generado por las dos pasadas oblicuas del tractor.

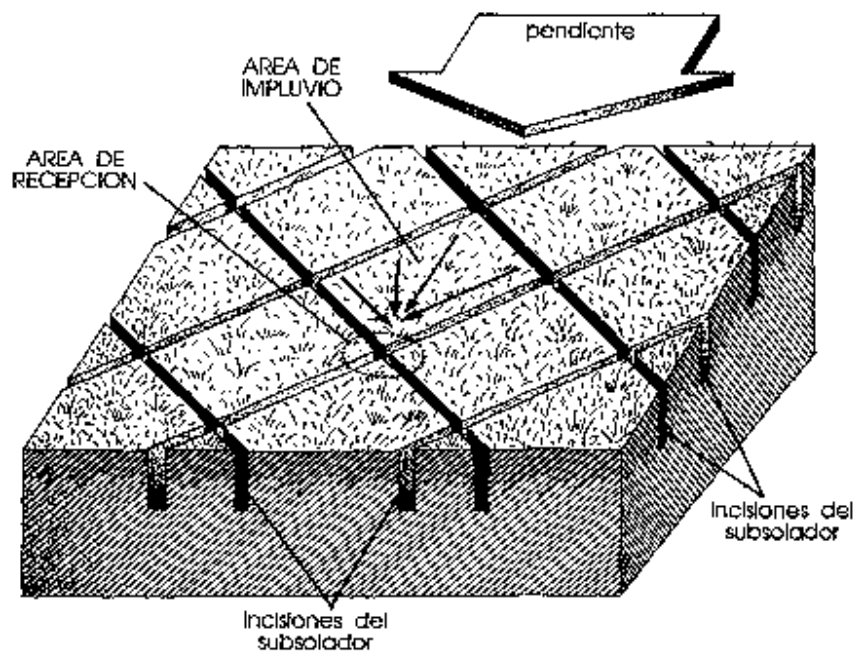
Según la economía del agua va teniendo menos importancia en la preparación del terreno, la unidad sistematizada va quedando más y más desdibujada hasta que termina por desaparecer: En el ahoyado y en las casillas tal identificación es ya bastante forzada; en el laboreo pleno carece por completo de sentido.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



**Terrazas de absorción
(en contrapendiente)**







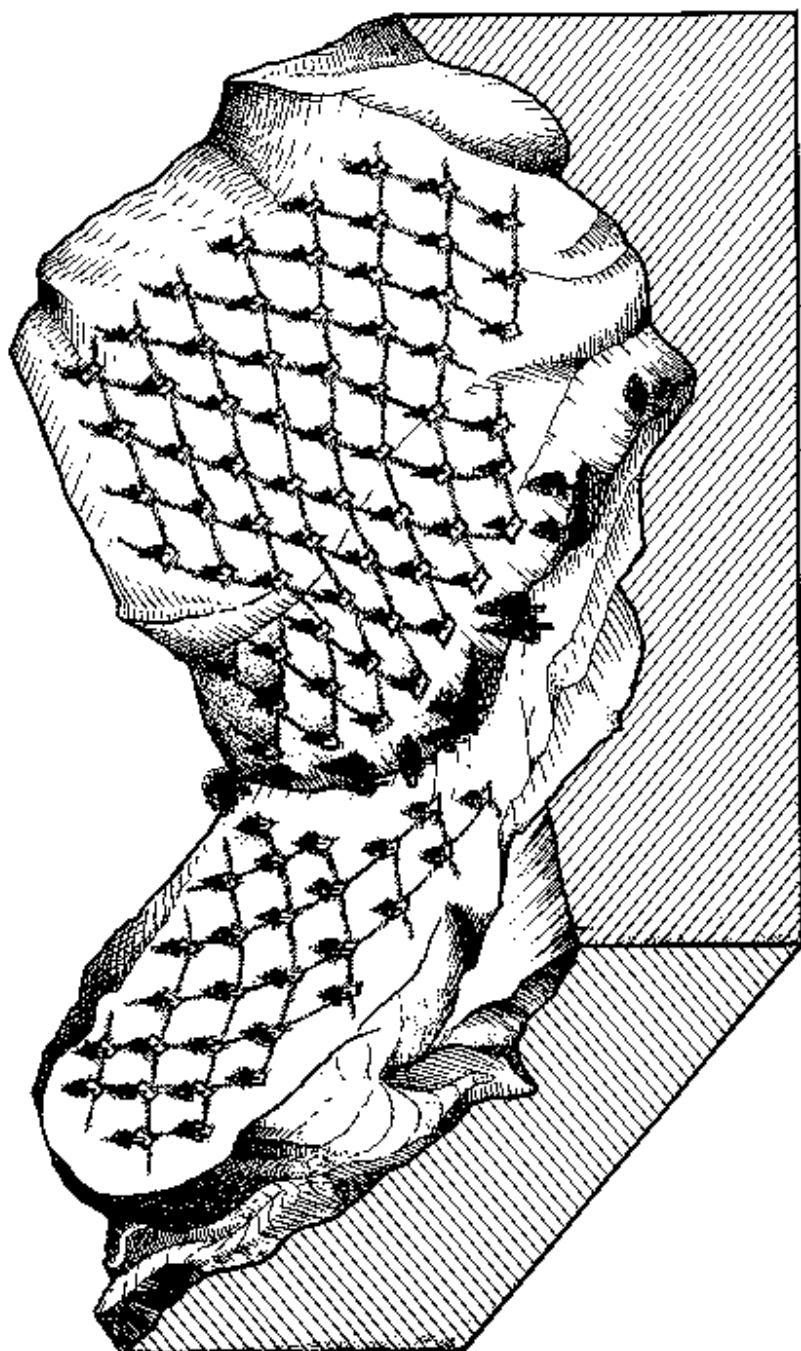
Subsolado pleno (completo)

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 le 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 escorrentía 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 escorrentía máximo capaz de ser retenido en su totalidad por el área colectora. En buena lógica, 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.



Ladera sistematizada con microcanales 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:

$$H = I = P + E_{s1} - E_{s2}$$

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, H) 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:

$$H = \text{DESP} = P + E_{s1} - E_{s2}$$

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:

$$H = PIMP = P - E_{s1}$$

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 del modelo MODIPE que se desarrolla 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:

$$PROM = \frac{S_1 \cdot PIMP + S_2 \cdot DESP}{S_1 + S_2}$$

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 ($|| DESP > P ||$), 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:

$$H = \text{ANTES} = P - \Delta E_s$$

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:

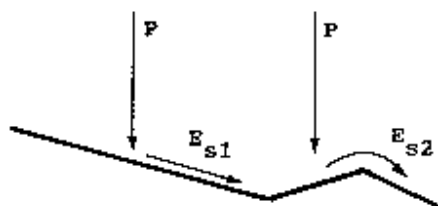
1) Una ladera sistematizada con el fin de incrementar sus disponibilidades hídricas se compone de un conjunto de unidades o estructuras proyectadas para funcionar como pequeñas cuencas endorreicas en la mayor parte de los episodios de lluvia del lugar.

2) Dentro de cada unidad sistematizada cabe distinguir entre el área donante 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:

$$\begin{aligned} \text{PIMP} &= P - E_{s1} \\ \text{DESP} &= P + E_{s1} - E_{s2} \\ \text{PROM} &= \frac{S_1 \cdot \text{PIMP} + S_2 \cdot \text{DESP}}{S_1 + S_2} \end{aligned}$$



siendo: P, la precipitación del aguacero analizado

PIMP, la disponibilidad hídrica del área de impluvio

DESP, la disponibilidad hídrica del área de recepción

PROM, la disponibilidad hídrica media de la ladera

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

E_{s2}, la escorrentía 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 escorrentía en el área de impluvio

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

$$\text{PROM} = \text{DESP} = \text{PIMP} = P$$

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

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

$$\text{PIMP} < P \quad \cap \quad \text{DESP} > P \quad \cap \quad \text{PROM} = P$$

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.

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

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

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

$$\boxed{\text{ANTES} = P - \Delta E_g}$$

en donde ΔE_g 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_g .

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

4. Ecuaciones generales

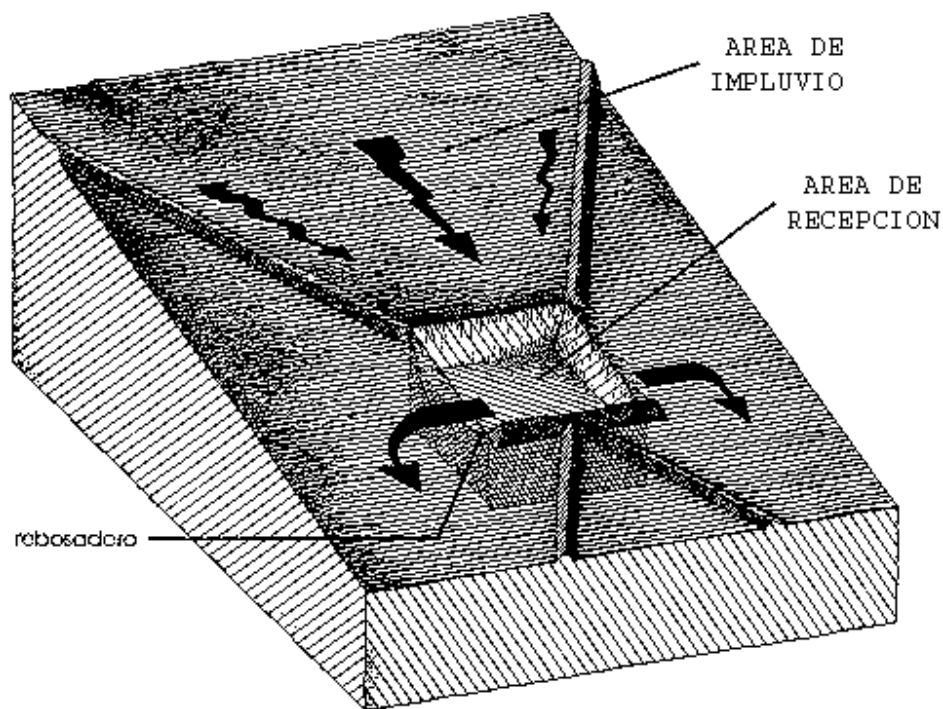
La hipótesis de independencia permite abordar el estudio de una sistematización primaria individualizando su estructura o unidad tipo. En este apartado vamos a analizar el comportamiento hidrológico de una unidad sistematizada ante un aguacero. Para ello hemos de definir las características físicas y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

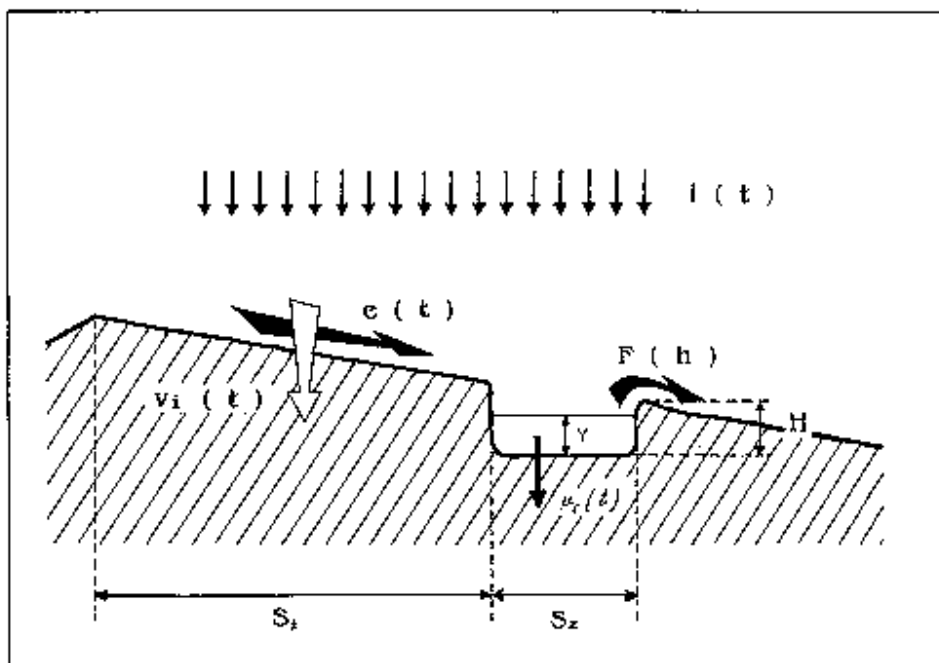
Cualquier unidad sistematizada se compone de un área de impluvio y de un área de recepción. Con el fin de facilitar la exposición nos vamos a fijar en una microcuenca. Se trata de la sistematización del terreno que mejor se ajusta a los planteamientos e hipótesis del modelo, pero en modo alguno hay que 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 microcuenca



Esquema conceptual de funcionamiento de una microcuenca con poceta

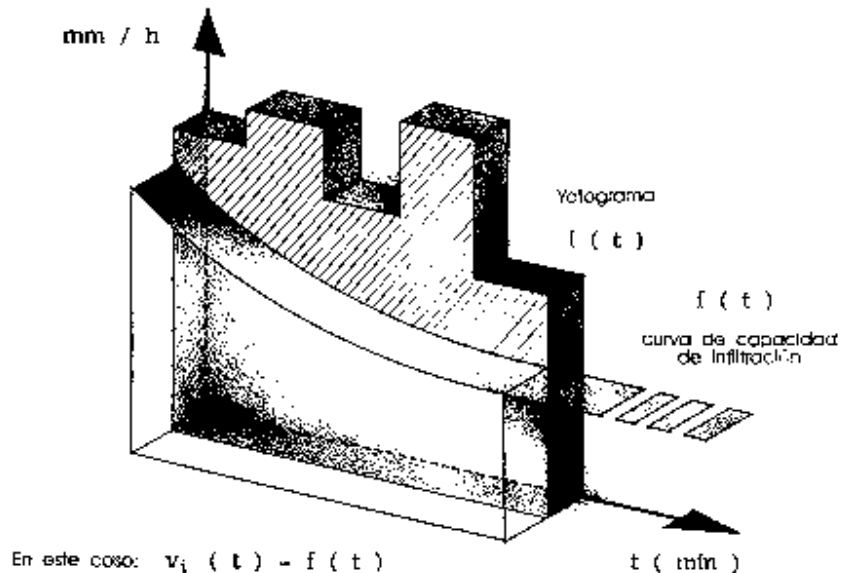
En el área de impluvio y por confrontación del yetograma ($i(t)$) con la curva de capacidad de infiltración ($f(t)$) obtenemos el yetograma neto que nos da la cantidad de lluvia que se convierte en escorrentía superficial. De esta forma podemos deducir el volumen de escorrentía superficial que genera 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 está encharcado (es decir: una vez se ha alcanzado el tiempo de encharcamiento)

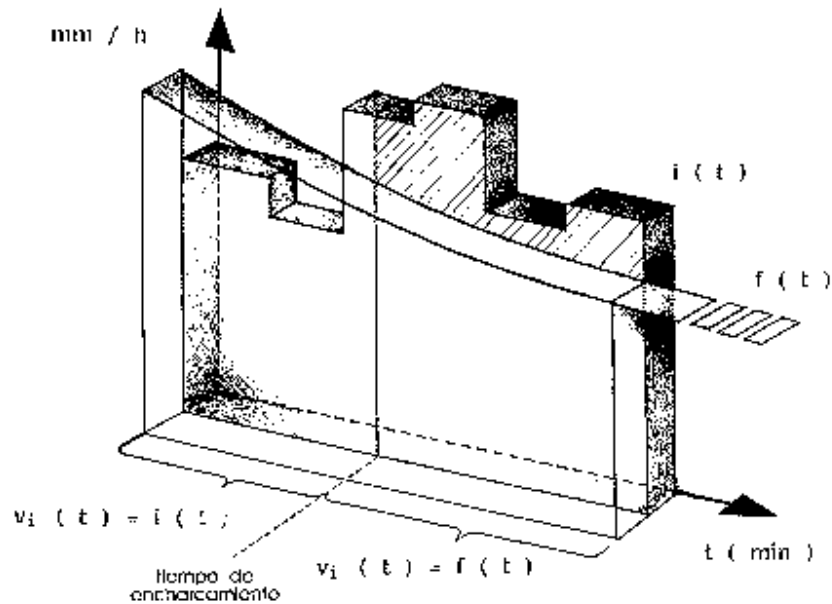
$$v_i(t) = \begin{cases} i(t) & \text{[si el suelo no está encharcado]} \\ f(t) & \text{[si el suelo está encharcado]} \end{cases}$$

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 [$e(t)$].

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



La situación antes descrita es bastante inusual. Casi todos los episodios de lluvia tienen al menos una fase 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 y de acuerdo con el modelo de Horton 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.

$$\text{PIMP} = \int_0^D v_{\dot{x}}(t) \cdot dt = \int_0^D [i(t) - e(t)] \cdot dt \quad [\text{en mm}]$$

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:

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

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:

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

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:

$$\frac{dV}{dt} = I - Q$$

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

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

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

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

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:

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

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 le 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:

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

en donde R_h es el radio hidráulico de la sección mojada (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 baste 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.

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

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

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

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;

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

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

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

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 $t = 0$ $\rightarrow y = 0$ (si $V_i = 0$)
 Para $t = D$ $\rightarrow y = y_f$ (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 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 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:

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

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. En concreto:

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

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:

$$DESP = P + E_{s1} - E_{s2}$$

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

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

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:

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

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 rebosadero 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:

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

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 escorrentía 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 domasias fuera de la unidad sistematizada

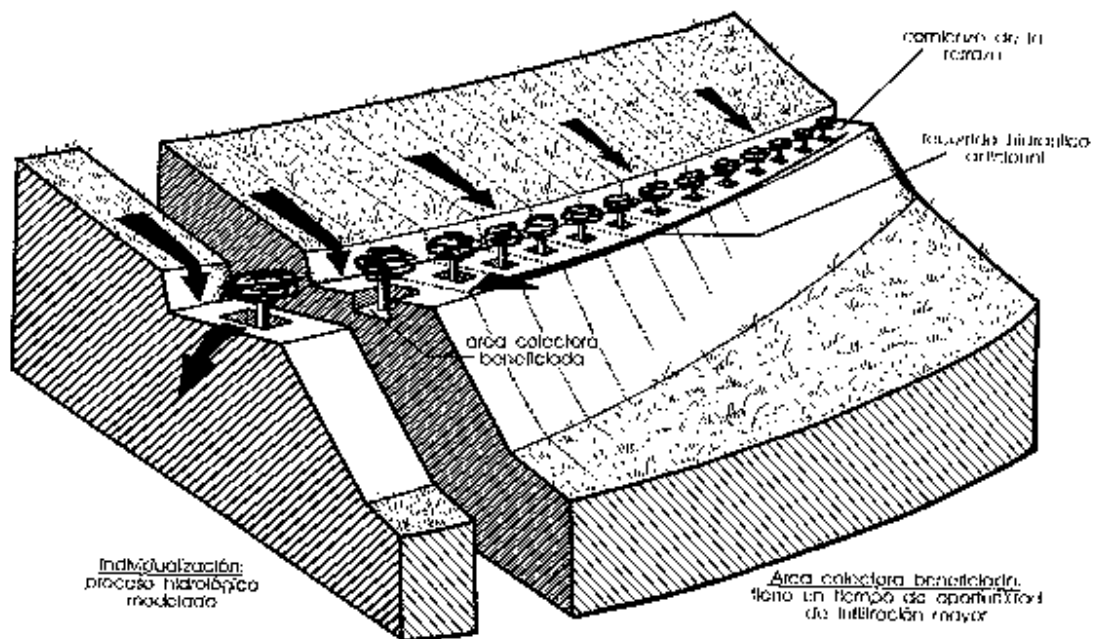
La disponibilidad hídrica media que genera el aguacero en la unidad sistematizada se calcula mediante la conocida ecuación:

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

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 infiltran 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 [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. Bibliografía

- ▶ Ayuso, J.L. (1990): Circulación de flujos; p. 1 - 17; monografía n^o 179; ed. Servicio de Publicaciones de la U. de Córdoba
- ▶ Boers, Th. M. y Ben Asher, J. (1982): A review of rainwater harvesting; *Agricultural Water Management*, 5; p. 145 - 158
- ▶ Evenari, M. (1982): Ökologisch-landwirtschaftliche Forschungen im Negev; p. 27 - 77; ed. Technische Hochschule Darmstadt
- ▶ 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
- ▶ 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)
- ▶ 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)

- ▶ Morales Gil, A.(1969): El riego con aguas de avenida en las tierras subáridas; Papeles de Geografía de la Universidad de Murcia, n° 1; p. 167 - 183

- ▶ Serrada, R.(1993): Apuntes de repoblaciones forestales; p. 215 - 236; ed. Fundación Conde del Valle de Salazar (Madrid)

- ▶ 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

- ▶ 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° 1; p.401 - 427; ICONA (Madrid)

- ▶ Thames, J.L.(1992): Water harvesting; en "Role of forestry in combating desertification"; p. 234 - 252; conservation guide n° 21; ed. FAO (Roma)