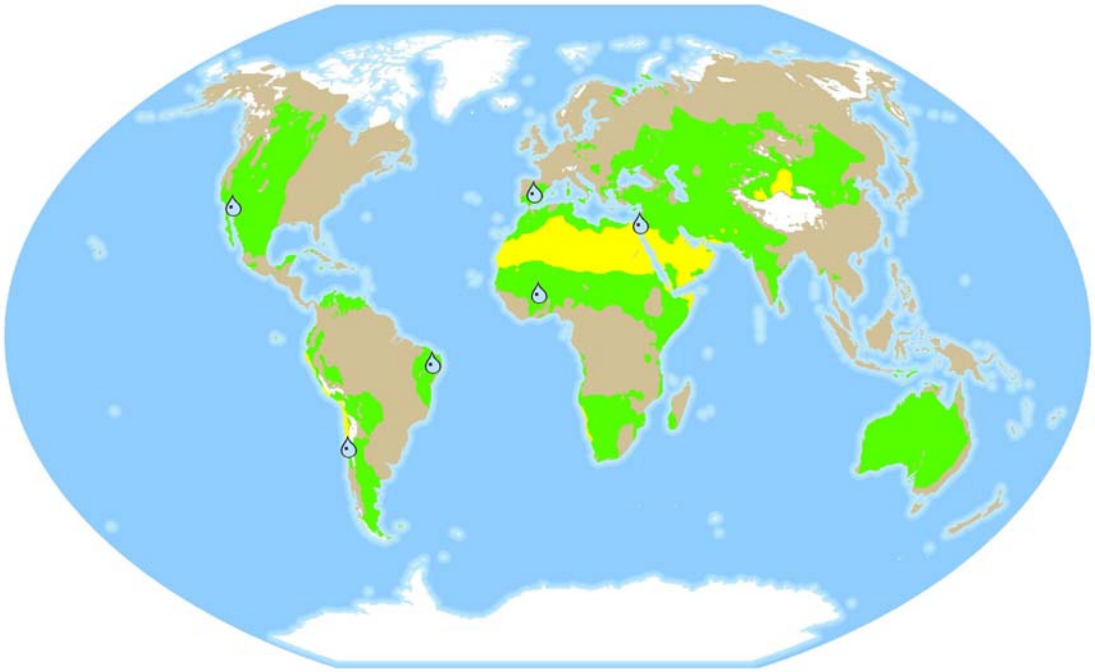
MODIPÉ

Estudio de casos y ejemplos



Andrés MARTÍNEZ DE AZAGRA PAREDES
Jorge MONGIL MANSO
Jorge DEL RÍO SAN JOSÉ

Palencia (España) 2009

Índice

Presentación 4

Cuestiones básicas sobre la recolección de agua y sobre el modelo MODIPÉ 6

Cuestión 1: Recolección de agua 7
Cuestión 2: Oasificación 7
Cuestión 3: Balance hídrico fundamental 8
Cuestión 4: Datos de entrada de MODIPÉ 9
Cuestión 5: Precipitación límite 10
Cuestión 6: Hidrología de Conservación de Aguas 11
Cuestión 7: Relación entre números de curva 11
Cuestión 8: Preparación ideal del suelo en un sistema de recolección de agua ... 12
Cuestión 9: Tipos de precipitación 12
Cuestión 10: Precipitación límite en suelos impermeables 13
Cuestión 11: Sistematización primaria incompleta 16

Ejercicios para profundizar en la comprensión del modelo 17

Ejercicio 1: Determinación del tipo de suelo 18
Ejercicio 2: Serie progresiva del número de curva 19
Ejercicio 3: Área de impluvio impermeable y alisada 23
Ejercicio 4: Cálculo manual de valores principales..... 25
Ejercicio 5: Criterio ecológico 32
Ejercicio 6: Interpretación de resultados de MODIPÉ 33
Ejercicio 7: Interpretación de resultados de MODIPÉ 34

Casos prácticos de evaluación hidrológica de preparaciones del suelo 36

Ejemplo 1: Microcuencas Negarim 37
Ejemplo 2: Comparación entre dos preparaciones del suelo 41
Ejemplo 3: Terrazas en contrapendiente 44
Ejemplo 4: Terrazas en contrapendiente 49
Ejemplo 5: Zanjas de infiltración 58
Ejemplo 6: Estampado de suelos 69
Ejemplo 7: Técnica zai 76
Ejemplo 8: Sistematización primaria incompleta 84

Formulario 97

Bibliografía 110

Apéndices 113

Apéndice 1: Tabla general del número de curva 114
Apéndice 2: Tabla de *N* para zonas áridas y subdesérticas 115

Apéndice 3: Correspondencia entre asociaciones vegetales …… 116
Apéndice 4: Ponderación de números de curva …… 117
Apéndice 5: Zanjas de infiltración ……. 122
Apéndice 6: Relación de símbolos …….. 123
Apéndice 7: Regiones oasificables ……...…126
Apéndice 8: Esquemas ……..…… 127
Mapamundi …….. 131

PRESENTACIÓN

Un proceso ambiental con consecuencias tan funestas como es la desertificación requiere soluciones y herramientas eficaces. La desertificación fue descrita y definida por André Aubréville en 1949, en su famoso libro titulado "Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale". Se trata de un proceso complejo que reduce la productividad y el valor de los recursos naturales, en el contexto específico de condiciones climáticas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, como resultado de variaciones climáticas y actuaciones humanas adversas. Entre los factores naturales que inciden en la desertificación pueden mencionarse los climáticos (como la sequía, la aridez o las lluvias torrenciales) y los geomorfológicos (fuertes pendientes y suelos fácilmente erosionables, entre otros). Pero también influyen en la desertificación (¡y mucho!) factores de origen antrópico como son, por ejemplo, los incendios forestales (y otros procesos de deforestación), la explotación abusiva de acuíferos y la salinización de los suelos. Existen en nuestro Planeta unos 5.500 millones de hectáreas de tierras secas con riesgo de desertificación, y aproximadamente 4.100 millones de hectáreas de tierras afectadas por este grave proceso. En España, el Ministerio de Medio Ambiente estima que 16 millones de hectáreas poseen riesgo alto o muy alto de sufrir desertificación.

Si reducimos la escala de estudio y observamos al detalle un suelo, éste puede verse afectado por procesos de desertificación por aridez edáfica, es decir, por falta de agua en sus poros, por indigencia hídrica. Este serio problema suele estar provocado por la preponderancia de la escorrentía superficial sobre la infiltración. Así se da la paradoja de que bajo un clima relativamente lluvioso exista aridez edáfica debido a que el agua no llega a penetrar en el suelo, sino que escurre de forma superficial generando, a su vez, procesos erosivos importantes. Esto conduce a la degradación del suelo y de la vegetación, siendo en muchos casos prácticamente nulas las posibilidades de recuperación natural del ecosistema enfermo.

Desde los tiempos más remotos, el hombre ha recogido agua de escorrentía para utilizarla en la agricultura o en la ganadería. Como ejemplo ilustrativo, podemos mencionar la instalación de Avdat, situada en pleno desierto del Néguev (Israel). Este sistema, construido hace unos 4.000 años y perfectamente descrito y rehabilitado por Michael Evenari en la mitad del siglo pasado, consta de áreas productoras de escorrentía (laderas limpias de vegetación y con suelo alisado) y de zanjas excavadas según curvas de nivel (en ligerísima pendiente) que conducen el agua recogida a los campos de cultivo situados en el fondo del valle. – Así lograron cultivar los Nabateos cereales, cuyos requerimientos hídricos rondan los 500 l/m^2, en una región con una precipitación anual media de apenas 100 mm al año.

La restauración forestal de laderas degradadas en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas supone una de las principales actuaciones de lucha contra la desertificación por aridez edáfica, fundamentalmente por la benefactora acción del arbolado, que conserva, restaura y mejora el suelo y el microclima. Pero al mismo tiempo, la actividad repobladora en estas zonas supone un importante reto para los técnicos encargados de tan importante labor, puesto que al principal obstáculo de la escasez de agua por aridez y sequía, se añade la presencia general de suelos someros, esqueléticos y muy degradados.

España posee una larga tradición en materia de restauración hidrológico-forestal, y una gran cantidad de conocimientos y experiencias acumuladas al respecto, que conviene aprovechar, compartir y divulgar. Muchos de los métodos de preparación del suelo utilizados en repoblaciones funcionan como sistemas de recolección de agua (tal es el caso de los acaballonados, los ahoyados con microcuencas, los aterrazados, las banquetas o fajas, etc.). Pero lo más interesante es que la recolección de agua propicia también la captura de suelo, de nutrientes, de materia orgánica y de semillas, lo que sin duda incrementa las posibilidades de recuperación del ecosistema. De ahí surge el concepto de oasificación, como un proceso natural

que puede ser favorecido por el hombre mediante prácticas de conservación de aguas, de suelo y de nutrientes, con técnicas que propicien la infiltración de la lluvia *in situ* o levemente redistribuida en favor del repoblado.

Considerando la estrategia de la oasificación, las laderas áridas y semiáridas que estén enfermas se deben parcelar, es decir: se deben dividir en áreas de impluvio y áreas de recepción. Las primeras generan escorrentía, mientras que las segundas capturan, concentran y conservan el agua y el suelo. La Hidrología en estas laderas transciende del planteamiento habitual (que se preocupa por el agua que se escapa de la ladera y genera los caudales en los cauces), convirtiéndose en una Hidrología de Conservación de Aguas para la que lo sustancial es el agua que se infiltra en el suelo, y queda a disposición de las plantas, contribuyendo a la restauración de la vegetación. Con ello entramos de lleno en la Ecohidrología.

Una buena preparación del suelo resulta crucial para el éxito de toda restauración vegetal en zona árida o en ladera aquejada por un proceso de desertificación por aridez edáfica. Conscientes de esta realidad, iniciamos en 1992 una línea de investigación que nos adentró en el interesante campo de la recolección de agua. En 1995 creamos el modelo hidrológico MODIPÉ con el objetivo de ofrecer una herramienta práctica a los técnicos y gestores con la que diseñar sistemas de recolección de agua, es decir, sistemas de preparación del suelo eficaces en la lucha contra la desertización. MODIPÉ es una herramienta sencilla de utilizar, debido a su formato informatizado, pero al poseer una consistente formulación matemática (fundamentada en la ecuación de continuidad y en el modelo del número de curva), puede resultar difícil de usar e interpretar en su totalidad, si no se dispone de una serie de ejemplos prácticos de apoyo y referencia. Sólo así pueden vislumbrarse las muchas aplicaciones y posibilidades del modelo.

Con este objetivo hemos redactado la presente publicación. En ella ofrecemos un buen número de casos de estudio, discutidos y resueltos en profundidad: microcuencas Negarim en Israel, ahoyados Zaï en Burkina Faso, zanjas de infiltración en Chile, estampados de suelo en Arizona, aterrazados en España, y un largo etcétera hasta completar un total de veinticinco casos y ejercicios. El trabajo se estructura en tres capítulos principales: En el primero se abordan unas cuestiones básicas sobre la recolección de agua, sobre la oasificación y sobre el modelo MODIPÉ. La segunda parte es de transición; plantea y resuelve situaciones de complejidad intermedia. El tercer capítulo estudia ocho casos prácticos y complejos en profundidad. A este tercer bloque le sigue un pormenorizado capítulo en el que se detallan todos los conceptos, fórmulas y ecuaciones del modelo. Se ha puesto gran esmero en utilizar unos símbolos sencillos, claros y unívocos para todos los parámetros y variables que aparecen en el texto. Así mismo, se ha puesto especial atención en resolver cada cuestión con la máxima claridad, buscando en todo momento la sencillez en las explicaciones (aún a riesgo de incurrir en repeticiones y en pesadez).

Es nuestro deseo que este manual sea de utilidad a los técnicos oasificadores de todo el Mundo que se dedican a la encomiable labor de la restauración de ecosistemas enfermos, desertizados.

Los autores

En Palencia, a 30 de Noviembre de 2009

Cuestiones básicas

Cuestión 1

¿En qué consiste un sistema de recolección de agua?

R: Un sistema de recolección de agua consiste en dos partes, un área donde se induce y genera la escorrentía superficial (área de impluvio o de captación) y un área en donde se recogen y almacenan dichos aportes hídricos (área de recepción o de almacenamiento). Es en esta área donde se sitúa una cisterna (caso de los aljibes o alchubes), o en donde se instala un cultivo agrícola o se realiza una siembra o plantación de especies forestales. Las plantas se desarrollan mejor gracias al microclima favorable inducido en el área de recepción merced a las cosechas de agua. El riesgo de marras por indigencia hídrica se reduce mucho en los proyectos de forestación de laderas en zona seca, si se realiza una buena preparación del suelo que procure tales cosechas de agua al repoblado en sus primeros años de instalación.

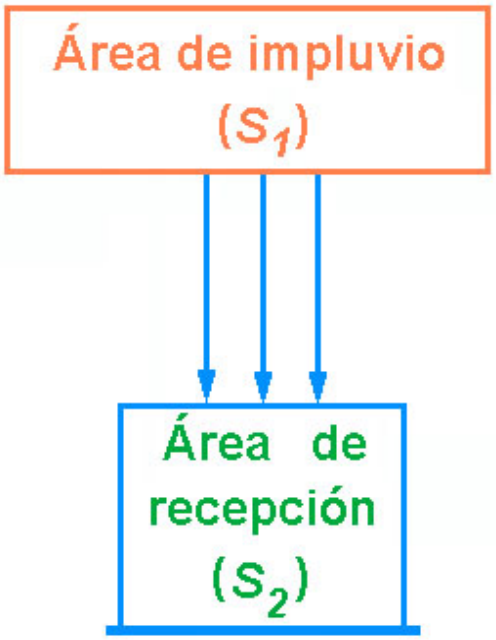


Figura 1: Principio de la recolección de agua

Cuestión 2

¿Qué otras cosechas lleva emparejada la recolección de agua?

R: Recolección de suelo, de nutrientes, de materia orgánica y de semillas. Proceso conjunto al que denominamos oasificación y que constituye la estrategia primordial para revertir fenómenos de desertificación (por aridez edáfica) (Martínez de Azagra *et al.*, 2006).

Oasificación = recolección de agua, suelo, nutrientes y semillas

Cuestión 3

Establezca el balance hídrico local para cuantificar la infiltración en el área de recepción e indique el significado de sus términos.

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

siendo: I = volumen de agua infiltrado (disponibilidad hídrica en el área de recepción)
P = precipitación
I_t = interceptación (o intercepción)
E = evaporación física desde la superficie del suelo
E_{s1} = agua que llega al área de recepción por escorrentía desde el área de impluvio
E_{s2} = agua que escapa del área de recepción por escorrentía superficial

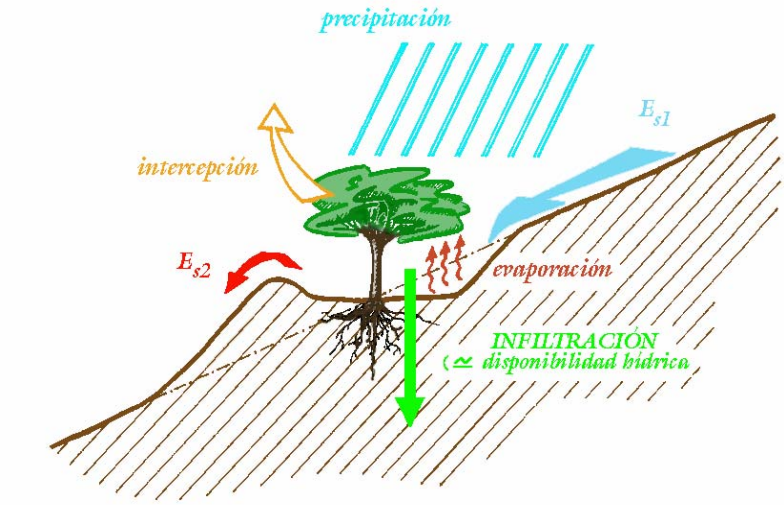


Figura 2: Balance hídrico para modelizar la recolección de agua

Para el caso de un terreno degradado (sin apenas vegetación) y si las trampas de agua son pequeñas, la ecuación anterior puede simplificarse con lo que queda la siguiente expresión:

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

Esta última ecuación resulta básica a la hora de modelar la recolección de agua. Supone el punto de partida del modelo MODIPÉ (Martínez de Azagra, 1996).

Aclaración: Si la vegetación es muy rala y pequeña en el área de recepción (pues acabamos de preparar el terreno y hemos plantado un brinzal que tiene una o dos savias) la intercepción será despreciable en dicho área ($I_t \approx 0$ mm). A su vez, la evaporación física del agua almacenada en el microembalse, antes de que se infiltre, tampoco es relevante ($E \approx 0$ mm) pues hay que evitar periodos de encharcamiento prolongados en el área de recepción (es decir: el tamaño de la trampa de agua ha de ser apropiado). Para un tiempo de anegamiento inferior a un día, E puede tomar valores comprendidos entre 1 y 5 mm (máxima tasa de evaporación diaria en verano), cifras que pueden ser desdeñadas a los fines que perseguimos.

Cuestión 4

¿Cuáles son los datos de entrada del modelo hidrológico MODIPÉ?

R: El modelo tiene siete datos principales de entrada; tres datos topográficos, tres datos hidrológicos y un dato meteorológico; a saber:

Datos topográficos:

Tamaño del área de impluvio, S_1 (en m^2)
Tamaño del área de recepción, S_2 (en m^2)
Capacidad de embalse del área de recepción, *CAPA* (en litros)

Datos hidrológicos:

Número de curva de la ladera actual, *NAC* (adimensional)
Número de curva del área de impluvio, *NI* (adimensional)
Número de curva del área de recepción, *NR* (adimensional)

Datos meteorológicos:

Precipitación del aguacero, *P* (en mm)

Al final del apéndice 8 puede verse un esquema con los datos principales de entrada del modelo. A su vez, la figura 22 muestra un volcado de la pantalla de datos de entrada del programa MODIPÉ (2.0).

Además, hay que considerar la condición previa de humedad del suelo (justo antes de iniciarse el aguacero), *J* (= 1, 2 ó 3). Se trata de un dato hidrológico.

$J = 1 \leftrightarrow$ suelo muy seco
$J = 2 \leftrightarrow$ suelo en situación intermedia
$J = 3 \leftrightarrow$ suelo muy húmedo

Si se trabaja con la opción anual, la precipitación individual de los aguaceros se sustituye por doce ternas mensuales. Cada terna está formada por: la precipitación del mes, P_m (en mm), la precipitación máxima diaria del mes ($P_{máx}$) y el número de días del mes con precipitación apreciable (*na*). Este resumen parcial de los aguaceros acaecidos lo transforma el programa informático MODIPÉ en aguaceros virtuales. Como caben distintas posibilidades, para la concreción de tales aguaceros virtuales el usuario del programa debe decidir el tipo de escorrentía:

caso I $\leftrightarrow$ mínima escorrentía
caso II $\leftrightarrow$ máxima escorrentía
caso III $\leftrightarrow$ escorrentía intermedia

El procedimiento de los aguaceros virtuales puede verse desarrollado con detalle en Martínez de Azagra (1996, 2004).

Conviene advertir que los números de curva a introducir en los programas informáticos (tanto en la versión 1.1 como en la versión 2.0 de MODIPÉ) se refieren a la condición intermedia de humedad antecedente ($J = 2$). Son los que vienen en los apéndices 1 y 2, y los que maneja el programa NumCur (1.0).

Por último, señalar que en el caso de que el área de impluvio tenga características hidrológicas heterogéneas, se puede dividir ésta en distintos complejos hidrológicos (hasta un máximo de cinco, en MODIPÉ (2.0)) en cuyo caso habrá que introducir más números de curva: uno por cada complejo hidrológico considerado.

Cuestión 5

¿Qué se entiende por precipitación límite de una unidad sistematizada?

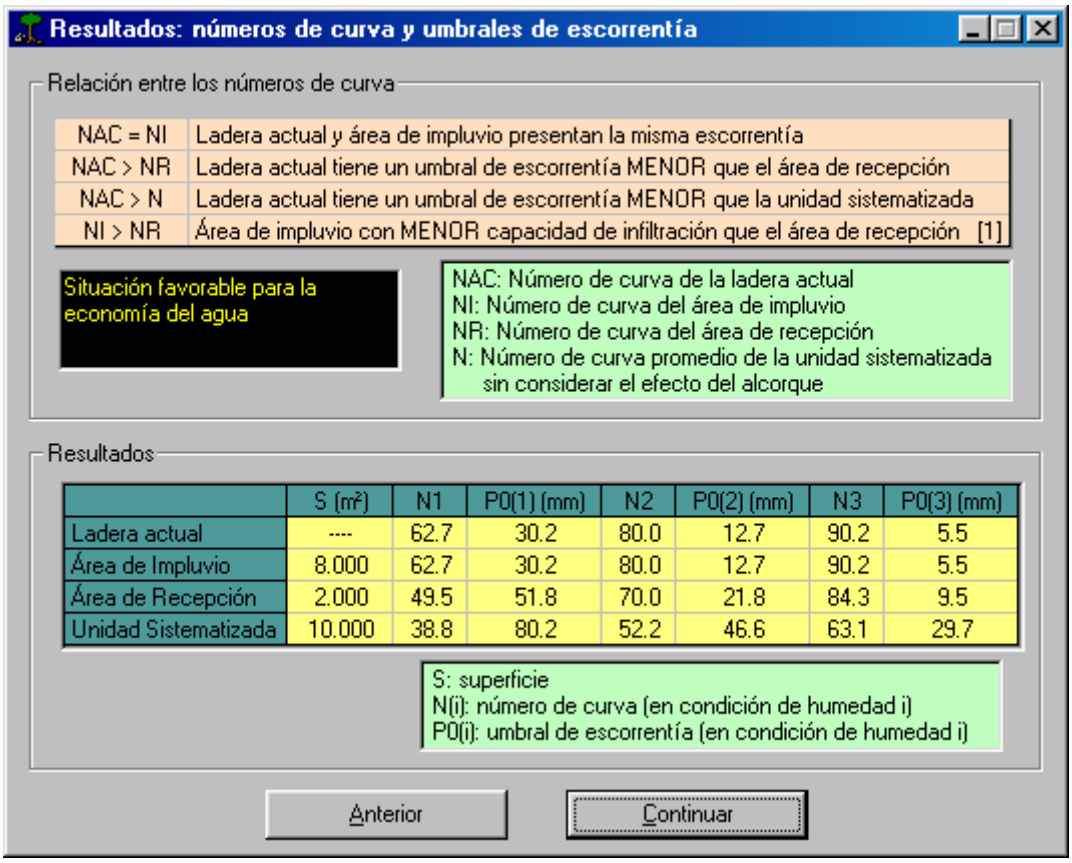
R: Es el umbral de escorrentía de la unidad sistematizada considerando el efecto del alcorque.

Precipitación máxima, a partir de la cual la unidad sistematizada deja de ser endorreica. Si llueve más que la precipitación límite, E_{s2} deja de ser nulo.

Se trata de un concepto crucial para entender las técnicas de recolección de agua. En este texto se simboliza por *P2*. [1]

Conviene señalar que *P2* no se corresponde con la lluvia caída hasta el momento en el que se producen los primeros charcos en el área de recepción, sino que *P2* coincide con la lluvia total caída cuando comienza el vertido de agua por los *aliviaderos* del microembalse (es decir: por sus rebosaderos o sangradores).

En el programa informático MODIPÉ aparece una tabla de resultados con las precipitaciones límite (de la unidad sistematizada) en las tres condiciones de humedad que contempla el método del número de curva. Para el caso del ejemplo de la figura 3 estos valores son: *P2(1)* = 80,2 mm, *P2(2)* = 46,6 l/m^2 y *P2(3)* = 29,7 mm.



	S (m²)	N1	P0(1) (mm)	N2	P0(2) (mm)	N3	P0(3) (mm)
Ladera actual	----	62.7	30.2	80.0	12.7	90.2	5.5
Área de Impluvio	8.000	62.7	30.2	80.0	12.7	90.2	5.5
Área de Recepción	2.000	49.5	51.8	70.0	21.8	84.3	9.5
Unidad Sistematizada	10.000	38.8	80.2	52.2	46.6	63.1	29.7

Figura 3: Volcado de una pantalla de MODIPÉ 2.0

[1] En el apéndice n.º 6 figuran todos los símbolos manejados en esta colección de ejercicios junto con su significado.

Cuestión 6

¿Qué se entiende por Hidrología de Conservación de Aguas?

R: La Hidrología de Conservación de Aguas (HICONA) es una rama de la Hidrología de Superficie cuyo objeto de estudio es la infiltración a escala local o la cuantificación de la disponibilidad hídrica existente en un punto del terreno (Martínez de Azagra, 2008). HICONA parte del ciclo hidrológico local [véanse las dos ecuaciones de la cuestión 3], poniendo especial énfasis en el componente de la infiltración (*I*) y en la definición de los tiempos característicos que describen el funcionamiento de una microcuenca.

Cuestión 7

En cuál de los dos casos es más conveniente una trampa de agua: ¿si $NI > NR$ o si $NI < NR$? Razone la respuesta. (*NI* = nº de curva del área de impluvio; *NR* = nº de curva del área de recepción)

R: Si el número de curva del área de recepción es mayor que el número de curva del área de impluvio, el área de almacenamiento (S_2) tendrá un umbral de escorrentía menor que el área de captación (S_1), con lo que tenderá a donar escorrentía al área de impluvio antes que a recibir escorrentía. En consecuencia: la trampa de agua será más conveniente (por no decir imprescindible) en el caso de que $NI < NR$ (con el fin de evitar la situación paradójica de que sea el área de recepción quien funcione como área de impluvio).
Cuando $NI < NR$ y para evitar la situación paradójica mencionada, los programas (MODIPÉ (1.1) y (2.0)) hallan el valor de *CAPMIN*, advirtiendo al usuario de que debe usar valores de *CAPA* superiores a tal valor:

$$CAPA > CAPMIN$$

CAPA = capacidad del microembalse
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 (E_{s1} antes que E_{s2})[2].

[2] En el formulario figura la expresión matemática concreta de *CAPMIN*.

Cuestión 8

Establezca las inecuaciones que definen una preparación ideal del suelo en una ladera desde el punto de vista de las cosechas de agua (de acuerdo con MODIPÉ).
[Notación: *NAC* = número de curva de la ladera actual, *NI* = número de curva en el área de impluvio, *NR* = número de curva en el área de recepción, *CAPA* = capacidad del alcorque, *P1* = umbral de escorrentía en el área de impluvio, *PAC* = umbral de escorrentía en la ladera degradada, antes de la intervención] [3]

R: $NAC > NR$; $NI > NR$; y $NI > NAC$ (siempre que *CAPA* garantice endorreísmo)

$NAC > NR$ (número de curva de la ladera actual (*NAC*) mayor que el número de curva del área de recepción (*NR*), lo que refleja que la preparación del suelo en el área de recepción ha sido positiva para la infiltración de agua)

$NI > NR$ (número de curva del área de impluvio (*NI*) mayor que *NR*, con lo que el área de recepción tiene la tendencia de recibir escorrentía del área de impluvio)

$NI > NAC$ (preparación del suelo que aumenta la escorrentía en el área de impluvio con respecto a la ladera actual, por ser su umbral de escorrentía más pequeño: $P1 < PAC$)

A su vez, *CAPA* ha de garantizar endorreísmo para que la preparación del suelo pueda considerarse ideal.

Cuestión 9

Distinga entre precipitación débil, idónea, excesiva y dañosa.

R: Precipitación débil, si $P \leq P1$ (no se producen cosechas de agua)

Precipitación idónea, si $P1 < P \leq P2$ (hay cosechas de agua siendo la microcuenca endorreica.)

Precipitación excesiva, si $P > P2$, pero la escorrentía puede ser evacuada de forma ordenada a través de la sistematización secundaria ($P \leq P4$).

Precipitación dañosa, si $P > P4$

siendo: *P* = precipitación del aguacero considerado, *P1* = precipitación mínima (= umbral de escorrentía del área de impluvio), *P2* = precipitación límite (de la unidad sistematizada), *P4* = precipitación máxima que puede ser evacuada de forma ordenada por la sistematización secundaria

[3] En el apéndice 6 figuran todos los símbolos manejados en esta colección de ejercicios junto con su significado.

Cuestión 10

El volumen de alcorque por unidad de superficie de la sistematización (*CAPA/S*) es un parámetro interesante para el estudio de la preparación del suelo por dos razones principales: evalúa el impacto paisajístico de dicha preparación y estima la precipitación límite, si la unidad sistematizada fuese totalmente impermeable. Compruebe esta última aseveración: primero, mediante un ejemplo numérico usando el programa MODIPÉ y, después, acudiendo a las fórmulas generales que calculan la precipitación límite (*P2*).

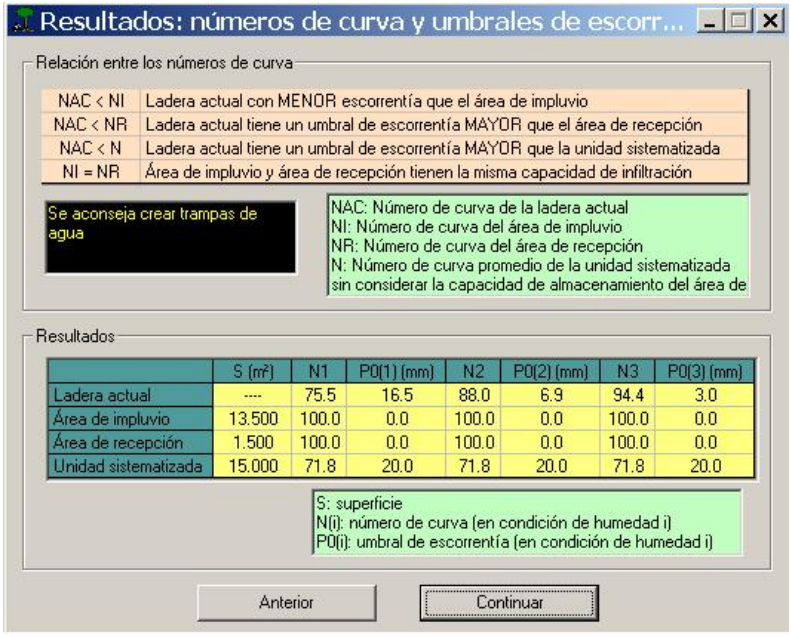
R: Como ejemplo numérico vamos a emplear el siguiente:

$S_1 = 13{,}5\ m^2$
$S_2 = 1{,}5\ m^2$
CAPA = 300 litros
NI = *NR* = 100 (área de impluvio y área de recepción totalmente impermeables)

El volumen de alcorque (*CAPA*) por unidad de superficie de la sistematización (*S*) vale:

$$\frac{CAPA}{S_1 + S_2} = CAPA/S = \frac{300}{15} = 20\ l/m^2$$

Usando el programa MODIPÉ (versión 2.0) se obtiene la figura 4:



	S (m²)	N1	P0(1) (mm)	N2	P0(2) (mm)	N3	P0(3) (mm)
Ladera actual	----	75.5	16.5	88.0	6.9	94.4	3.0
Área de impluvio	13.500	100.0	0.0	100.0	0.0	100.0	0.0
Área de recepción	1.500	100.0	0.0	100.0	0.0	100.0	0.0
Unidad sistematizada	15.000	71.8	20.0	71.8	20.0	71.8	20.0

Figura 4: Tabla principal de resultados de MODIPÉ

Analizando la tabla de la figura vemos que los umbrales de escorrentía de la unidad sistematizada (es decir: la precipitación límite *P2*) para las tres condiciones de humedad (*J* = 1, 2 y 3) valen 20,0 mm, y que se corresponden con un número de curva equivalente (*NEQ*) de 71,8.

$$NEQ = \frac{5.080}{P2 + 50{,}8} = \frac{5.080}{20 + 50{,}8} = 71{,}7514... \approx 71{,}8$$

Las fórmulas generales que calculan la precipitación límite (consúltese el manual de usuario del programa MODIPÉ, páginas 15 y 16, o el formulario al final de esta colección de ejercicios) son:

$$MAX = CAPA \qquad \text{y}$$

$$MAX = K \cdot \frac{(P - P0)^2}{P + 4 \cdot P0} \cdot (S_1 + S_2) \quad \text{para } NI \geq NR$$

siendo:

MAX la escorrentía máxima que puede escapar de la sistematización para alcorque nulo (en litros)

CAPA la capacidad del microembalse (en litros)

P0 es el umbral de escorrentía medio de la unidad sistematizada sin considerar el efecto alcorque (en mm). En este caso vale *P0* = 0 mm, pues se trata de terrenos impermeables (y lisos)

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*). En este caso vale 1, lógicamente.

S_1 y S_2 el área de impluvio y el área de recepción, respectivamente

J es la condición previa de humedad (1, 2 ó 3)

Combinando las dos ecuaciones anteriores se tiene:

$$MAX = CAPA \quad \Leftrightarrow \quad CAPA = \frac{(P - P0(J))^2}{P + 4 \cdot P0(J)} \cdot (S_1 + S_2)$$

Operando se obtiene una ecuación de segundo grado en *P* que nos da las precipitaciones límites (*P2*(*J*)):

$$P^2 - \frac{2 \cdot P0(J) \cdot (S_1 + S_2) + CAPA}{S_1 + S_2} \cdot P - \frac{4 \cdot CAPA \cdot P0(J)}{S_1 + S_2} + (P0(J))^2 = 0$$

$$P = P2(J) = P0(J) + \frac{CAPA}{2 \cdot (S_1 + S_2)} + \sqrt{\left[P0(J) + \frac{CAPA}{2 \cdot (S_1 + S_2)}\right]^2 + \frac{4 \cdot CAPA \cdot P0(J)}{S_1 + S_2} - (P0(J))^2}$$

A su vez, *P0* se obtiene a partir del número de curva promedio de la unidad sistematizada sin considerar el efecto alcorque (*NM*), es decir:

$$NM = \frac{NI \cdot S_1 + NR \cdot S_2}{S_1 + S_2} \qquad \text{y, finalmente,} \quad P0 = \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot NM}{NM}$$

Al ser en este caso $NI = NR = 100 \Rightarrow P0 = 0$ mm, luego:

$$P = P2(J) = 0 + \frac{CAPA}{2\cdot(S_1 + S_2)} + \sqrt[2]{\left[0 + \frac{CAPA}{2\cdot(S_1 + S_2)}\right]^2 + 0 - 0} = \frac{CAPA}{S_1 + S_2} = \frac{CAPA}{S}$$

Vemos que la precipitación límite (*P2*) coincide con el volumen de alcorque por unidad de superficie de la sistematización (*CAPA/S*) siempre que los números de curva valgan cien (*NI* = *NR* = 100).

En definitiva, podemos concluir que el parámetro $CAPA/S$ es un estimador por defecto de la precipitación límite (*P2*), resultado al que también se puede llegar directamente por consideraciones intuitivas sobre el problema:

$$P2 \geq \frac{CAPA}{S_1 + S_2}$$

Cuestión 11

Distinga entre una sistematización primaria plena y una sistematización primaria incompleta.

R: Un sistema de recolección de agua está formado por microcuencas. A su vez, una microcuenca (o unidad sistematizada) queda descrita (topográficamente) a partir de sus parámetros fundamentales, que son su tamaño (*S*), la relación entre área de impluvio y área de recepción (S_1/S_2), y la capacidad del microembalse (*CAPA*).

Por otro lado, la superficie puesta a disposición de cada planta (S_p) depende de la densidad de la repoblación:

$$S_p = \frac{10.000}{n}$$

siendo *n* el número de pies plantados por hectárea.

El tamaño de la unidad sistematizada (*S*) es la suma del área de impluvio y del área de recepción:

$$S = S_1 + S_2$$

Pues bien: Una sistematización primaria se denomina plena o completa cuando asegura que toda la escorrentía de S_p llegue al área de recepción. En caso contrario se habla de sistematización primaria incompleta o parcial. En esta última la obtención de cosechas de agua pasa a un segundo plano, puesto que una parte de la escorrentía generada en la ladera no se dirige hacia los alcorques, pudiéndose perder.

En parcelaciones completas el tamaño de la unidad sistematizada (*S*) coincide con la superficie destinada a cada planta (S_p). No ocurre así en sistematizaciones primarias incompletas, pues existen pasillos de escorrentía que reducen el tamaño de la unidad sistematizada respecto de la superficie puesta a disposición para cada planta (S_p). De esta forma:

- Para una sistematización completa: $S = S_1 + S_2 = S_p$

- Para una sistematización primaria incompleta: $S = S_1 + S_2 < S_p$

Preparaciones del suelo tales como el aterrazado en contrapendiente, el acaballonado, los subsolados con camellón, o las zanjas de infiltración crean sistematizaciones primarias completas. Por el contrario, todos los ahoyados con alcorque pero sin caballones laterales constituyen sistematizaciones primarias incompletas (véase la figura 48 del ejemplo n.º 8).

Ejercicios para profundizar

Ejercicio 1

Determinación del tipo de suelo según el método del número de curva: Sea un suelo yesoso y poco profundo ($p \approx 35$ cm) con tendencia a formar tastanas. Su textura USDA es: 50% de arcilla, 30% de limo y 20% de arena. Pedregosidad superficial muy escasa (inferior al 5%). Capacidad de infiltración final (f_c) estimada en 5 mm/h.

R: Todos los datos facilitados apuntan a que se trata de un suelo de tipo D.

Por tratarse de un suelo yesoso y poco profundo estaremos ante un litosuelo de tipo D.

La tendencia a formar costras superficiales (tastanas) también señala en igual dirección.

Acudiendo al diagrama textural (figura 5) concluimos, igualmente, que se trata de un suelo de tipo D (pertenece a la región I, denominada muy arcillosa).

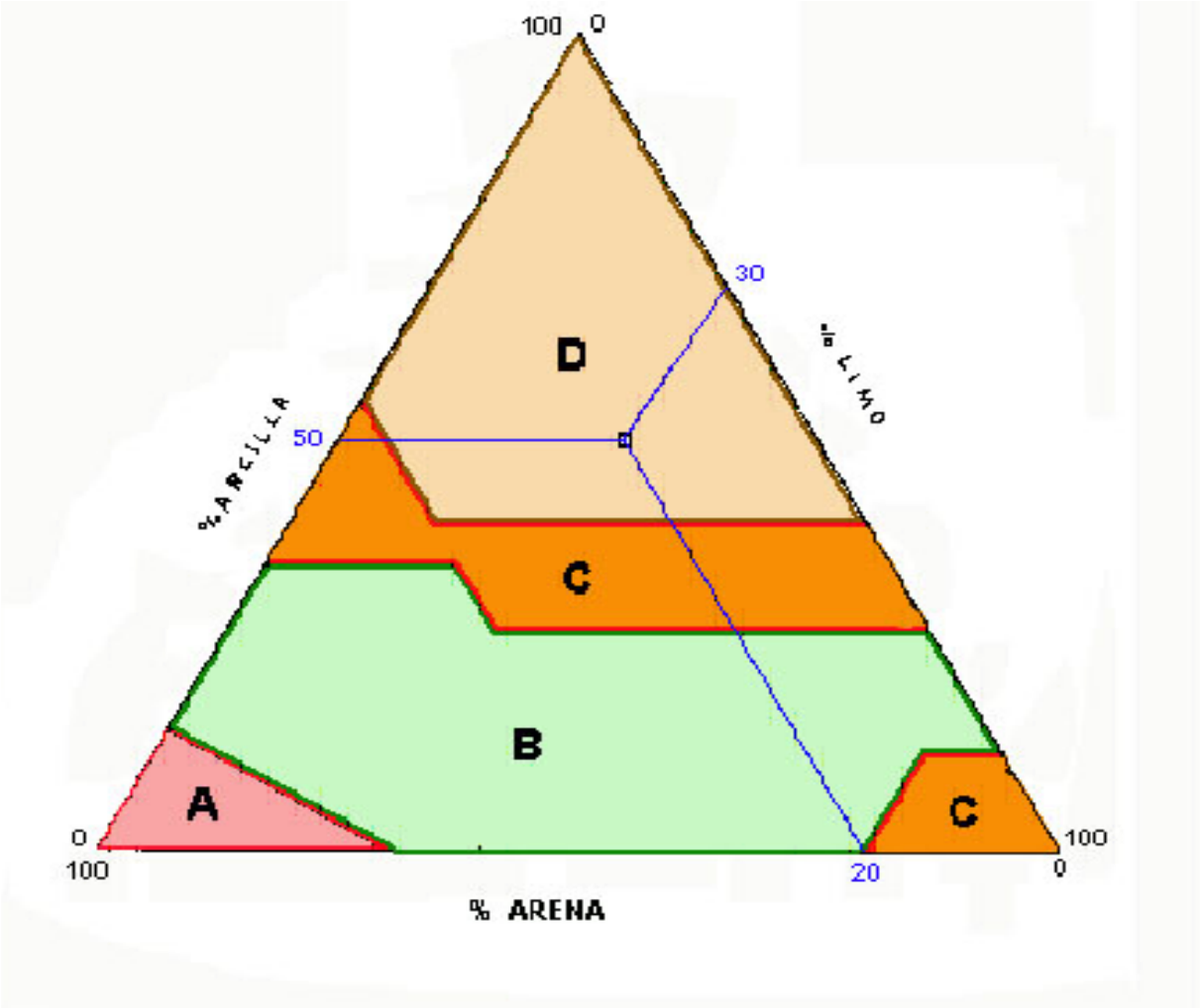


Figura 5: Diagrama triangular de textura con los tipos de suelo

El hecho de que el suelo tenga una baja pedregosidad superficial coadyuva a la formación de tastanas continuas (→ suelo de tipo D).

Por último, la capacidad de infiltración final (5 mm/h) resulta indicativa de que se trata de un suelo de tipo C.

Tabla 1. Tipos de suelo en el método del número de curva, según la tasa mínima de infiltración (f_c) (Ferrer, 2003) y recogidos por el programa NumCur 1.0

Tipo	f_c (en mm/h)
A	$f_c \geq 50$ mm/h
B	$20 < f_c < 50$
C	$1 < f_c \leq 20$
D	$f_c \leq 1$ mm/h

Haciendo balance, se observa que todos los criterios (a excepción del último) apuntan a que se trata de un suelo de tipo D, por lo que concluimos que el suelo es D.

Por lo general y en situaciones de discrepancia que puedan hacer dudar, se aconseja elegir el tipo de suelo que más escorrentía produzca. Al comienzo del formulario se aducen razones en favor de este criterio de selección.

Ejercicio 2

En unas laderas degradadas de solana en Almazán (Soria, España) crece una vegetación herbácea rala con alguna inclusión de aliagas (*Genista scorpius*), tomillos (*Thymus zygis*) y artemisias (*Artemisia campestris*) dispersos. Se trata de un suelo arcilloso de 25 - 35 cm de profundidad formado a partir de una calcarenita.

El terreno es pastoreado con cierta frecuencia lo que produce su compactación y su pobre condición hidrológica.

Se pretende realizar una repoblación forestal al amparo de unas ayudas de la PAC (Política Agraria Común) creando unos caballones según curvas de nivel distanciados 6 metros entre sí y que generen un número de curva equivalente de 70. Se va a plantar una mezcla de encinas (*Quercus ilex rotundifolia*) y quejigos (*Quercus faginea*) al tresbolillo. El terreno se acotará al pastoreo durante los primeros 25 años. Se prevé que dentro de 80 años la repoblación se corresponda con un bosque sobre suelo no compacto de tipo C que posea un arrope de 2 cm y un espesor de humus de 1 cm.

1) Estime el número de curva actual de las laderas.

2) Halle la condición hidrológica del bosque futuro y obtenga su número de curva.

3) ¿Cuánto valen los umbrales de escorrentía de la ladera actual, de la preparación del suelo y del bosque objetivo para unas condiciones medias de humedad?

4) ¿Cuánto va a disminuir el número de curva anualmente (de media) gracias a la repoblación?

5) ¿Le parece adecuada la preparación del suelo desde el punto de vista ecológico?

R1: Tenemos un pastizal cuya condición hidrológica es pobre y que crece en un suelo somero y arcilloso (de tipo D). Yendo a las tablas (apéndice 1), el número de curva que encontramos es *NAC* = 89.
Igual resultado obtendremos si trabajamos con el programa NumCur.

R2: Con una capa de hojarasca de 2 cm (LA ≈ 0,79 pulgadas), un espesor de humus de 1 cm (H ≈ 0,39 pulgadas) y sabiendo que el suelo es suelto (que se corresponde con C = 3 en el ábaco) entramos en el nomograma de Morey (véase la figura 6) y concluimos que se trata de la condición hidrológica IV (es decir: una condición hidrológica buena).

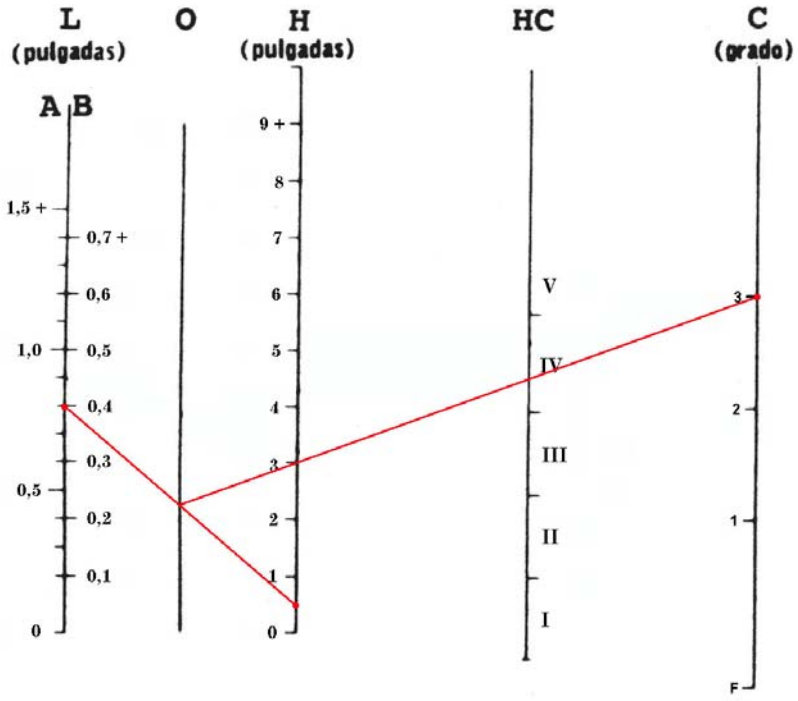


Figura 6: Nomograma para la determinación de la condición hidrológica de un bosque (en Udall & Dominy, 1966)

Con el programa informático NumCur se llega a idéntico resultado.

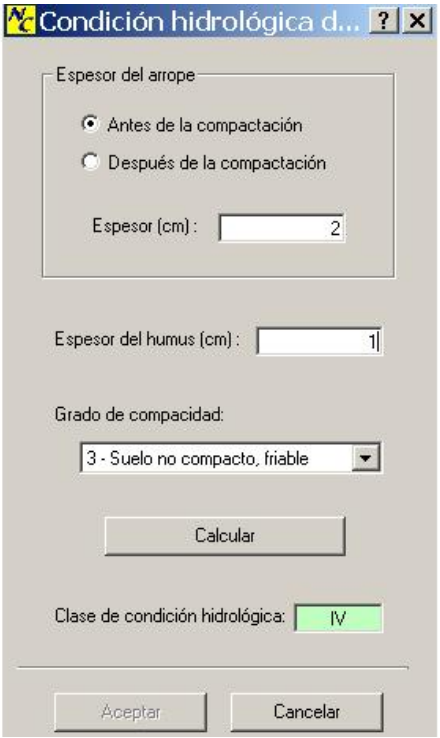


Figura 7: Volcado de pantalla de NumCur 1.0

El número de curva del bosque objetivo se obtiene usando NumCur o utilizando las tablas habituales (Martínez de Azagra, 1996; Martínez de Azagra *et al.*, 2003): $N_{obj} = 63$ (bosque con condición hidrológica IV en un suelo C) (Véase el apéndice 1).

R3: El umbral de escorrentía (P_0) está ligado con el número de curva (N) a través de la ecuación:

$$P_0 = \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot N}{N}$$

Para la situación actual:

$$PAC = \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot NAC}{NAC} = \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot 89}{89} = 6{,}28 \ mm$$

El umbral de escorrentía de la preparación del suelo (es decir: la precipitación límite) valdrá:

$$P2 = \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot NEQ}{NEQ} = \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot 70}{70} = 21{,}77 \ mm$$

Por último, el umbral de escorrentía del bosque objetivo vale:

$$P_{obj} = \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot N_{obj}}{N_{obj}} = \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot 63}{63} = 29{,}83 \ mm$$

R4: La serie progresiva prevista para el número de curva es:

$$NAC \rightarrow\rightarrow\rightarrow N_{obj} \equiv 89 \rightarrow\rightarrow\rightarrow 63$$

Esta evolución favorable de la capacidad de infiltración del suelo se produce en ochenta años. En consecuencia, la disminución anual del número de curva valdrá:

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{89 - 63}{80} = 0{,}325$$

Con el programa NumCur pueden hacerse estos cálculos de forma directa:

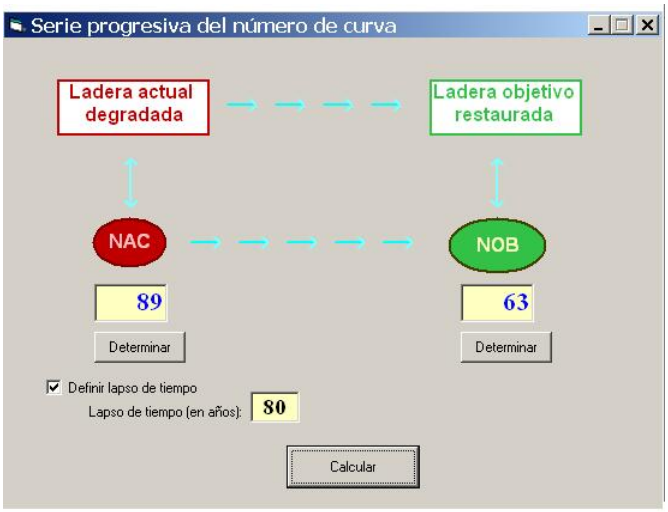


Figura 8: Volcado de pantalla de NumCur 1.0

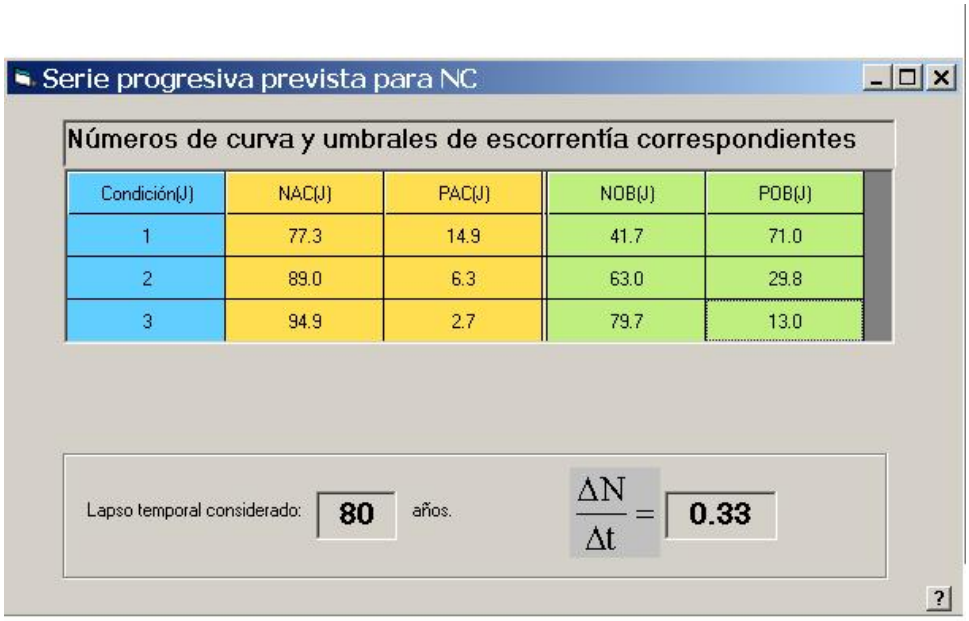


Figura 9: Tabla de NumCur (1.0) con los números de curva y sus umbrales de escorrentía correspondientes a la situación actual y a la situación futura (u objetivo)

R5: Puesto que el número de curva equivalente (*NEQ*) de la preparación del suelo queda entre el número de curva de la ladera actual (*NAC*) y el número de curva del bosque futuro (N_{obj}), puede considerarse que la preparación del suelo es correcta desde el punto de vista ecológico.

$$NAC < NEQ \leq N_{obj}$$

$$89 < 70 \leq 63$$

Nota: En un trabajo de Mongil & Martínez de Azagra (2006) puede verse el criterio ecológico de dimensionado de microembalses con detalle, junto a otros criterios adicionales para fijar *CAPA* y $R = S_1 / S_2$.

Ejercicio 3

El área de impluvio de una microcuenca se ha impermeabilizado y alisado al cien por cien para obtener el máximo de cosechas de agua. El área de recepción tiene 2 m^2 y un alcorque de 300 litros de capacidad siendo su número de curva *NR* = 80. El tamaño de la unidad sistematizada es de 12 m^2.
Sobre esta microcuenca cae un aguacero de 33,6 mm que coincide con su precipitación límite.

Calcule:
1) El número de curva del área de impluvio.
2) La altura (aproximada) de los muretes del alcorque.
3) La escorrentía superficial que recibe el área de almacenamiento.
4) La cantidad de agua que escapa de la unidad sistematizada.
5) La disponibilidad hídrica (infiltración) en el alcorque.
6) La disponibilidad hídrica promedio en la microcuenca.

R1: *NI* = 100. El número de curva del área de impluvio es máximo, pues se trata de una superficie impermeable y alisada (es decir: sin microdepresiones).

R2: Como la trampa de agua se sitúa en el área de recepción y asumiendo que ocupa todo ese área, valdrá: $CAPA \approx H \cdot S_2 \Rightarrow H \approx \frac{CAPA}{S_2} = 150 \ \ mm$

R3: Por ser el área de impluvio totalmente impermeable, todo el agua que cae en dicha superficie escurre hacia el área de recepción. La cosecha de agua será:

$$E_{s1} = P \cdot S_1 = 33{,}6 \text{ l/m}^2 \cdot 10 \text{ m}^2 = 336 \text{ litros}$$

R4: La cantidad de agua que escapa de la unidad sistematizada es nula: $E_{s2} = 0$ mm
Siempre que caiga un aguacero igual o inferior a la precipitación límite se da esta circunstancia, es decir: el endorreísmo queda asegurado siempre que:

$$P \leq P2 = 33{,}6 \text{ l/m}^2$$

R5: La ecuación fundamental de partida establece que:

$$DESP = P + E_{s1} - E_{s2} \ \text{(en mm)}$$

Sustituyendo valores: $DESP = 33{,}6 + 33{,}6 \cdot \frac{10}{2} - 0 = 201{,}6 \ \ l/m^2$

Nota: La escorrentía del área de impluvio vale 336 litros, que se reparten en los 2 m^2 que tiene el área de recepción.
En definitiva: La disponibilidad hídrica en el área de almacenamiento es de 201,6 mm.

R6: La disponibilidad hídrica promedio en la unidad sistematizada (*PROM*) coincide, en este caso, con la precipitación caída, e.d.: *PROM* = *P* = 33,6 l/m^2., pues E_{s2} = 0 mm. Esta situación se da siempre que la lluvia no rebase la precipitación límite (*P2*). El agua

se redistribuye dentro de la unidad sistematizada (*PIMP*, en el área de impluvio; *DESP* en el área de recepción) pero, de promedio, la microcuenca recibe *P* mm, si hay endorreísmo. Comprobémoslo en este caso particular:

$$DESP = 201{,}6 \ \ l/m^2$$

$PIMP = 0 \ \ mm$ (por ser el área de impluvio impermeable)

$$PROM = \frac{PIMP \cdot S_1 + DESP \cdot S_2}{S_1 + S_2} = \frac{0 \cdot 10 + 201{,}6 \cdot 2}{12} = 33{,}6 \ \ mm$$

Ejercicio 4

Las dimensiones de una microcuenca y sus características hidrológicas se dan a continuación:

Sistematización plena
Banqueta de 1,25x0,8 m^2 (S_2 = 1 m^2)
Área de impluvio de 9 m^2 (S_1 = 9 m^2)
Número de curva en el área de impluvio (en condición J = 2): NI=93
Número de curva en la banqueta (en condición J = 2): NR = 83

Utilice el programa informático MODIPÉ para:

1) Hallar la precipitación mínima del aguacero que origina escorrentía superficial en el área de impluvio para las tres condiciones de humedad que considera el método del número de curva.
2) Obtener los umbrales de escorrentía de la microcuenca para las tres condiciones de humedad que contempla el método del número de curva si no se ha perfilado un alcorque en la banqueta (es decir: $CAPA$ = 0 litros).
3) Plantear las ecuaciones que calculan la precipitación límite de la sistematización si la capacidad de la trampa de agua es de 150 litros.

Tras la repoblación realizada en enero de 2005 y hasta el 30 de junio de ese mismo año se produjeron los siguientes episodios de lluvia:

Febrero: 4 aguaceros; P_1= 35 mm ; P_2= 19 mm ; P_3= 6 mm ; P_4= 2,5 mm (en condición J = 3)

Marzo: 2 aguaceros P_5= 40 mm ; P_6= 9 mm (en condición J = 2)
Abril: 2 aguaceros P_7= 9,5 mm ; P_8= 10,3 mm (en condición J = 1)
Mayo: 1 aguacero P_9= 50 mm (en condición J = 1)
Junio: 1 aguacero P_{10}= 37 mm (en condición J = 1)

4) Calcule el incremento de dotación de agua que se habrá conseguido mediante la microcuenca en la banqueta desde febrero hasta junio (en l/m^2) si se ha realizado un alcorque de 150 litros (respecto del área impluvio y respecto de un terreno llano).
5) Haga los mismos cálculos para $CAPA$ = 0 litros.
6) Obtenga el coeficiente de escorrentía (C) en la ladera degradada para los cinco meses considerados suponiendo que su número de curva coincide con el del área de impluvio ($NAC = NI$).
7) ¿Cuánto vale el coeficiente de escorrentía de la ladera sistematizada con $CAPA$ = 0, y con $CAPA$ = 150 litros?

Nota: Los números de curva elegidos se corresponden con:

- $NAC = NI$ = 93 $\leftrightarrow$ Herbazal pobre, suelo de tipo D en una zona árida [Consúltese la tabla del número de curva para zonas áridas; apéndice 2]
- NR = 83 ($< NAC$; hipótesis optimista en cuanto a la preparación del suelo en la banqueta) Número de curva conseguido al abrir unos hoyos profundos (p > 50 cm) y aportar enmiendas (materia orgánica, residuos sólidos urbanos,…) hasta conseguir un barbecho CR (con cubierta de residuos vegetales) con condición hidrológica buena; suelo tipo B. [Véase la tabla principal del número de curva, apéndice 1.]

R1, R2 y R3: Utilizamos para la resolución del ejercicio la versión 1.1 del programa MODIPÉ, que nos ofrece las siguientes pantallas:

Para *CAPA* = 0 litros

```
        Número de curva de la ladera actual en condición 2 :  93.0
Area de impluvio ( en m² ):      9.0 ||  Número de curva en condición 2 : 93.0
Area de recepción ( en m² ):     1.0 ||  Número de curva en condición 2 : 83.0
          Capacidad de embalse del area de recepción ( en l ):    0.0
     Umbrales de escorrentía en la ladera actual
En condición  1  el umbral vale    9.1  mm
En condición  2  el umbral vale    3.8  mm
En condición  3  el umbral vale    1.7  mm

     Umbrales de escorrentía para el área de impluvio
En condición  1  el umbral vale    9.1  mm
En condición  2  el umbral vale    3.8  mm
En condición  3  el umbral vale    1.7  mm

     Umbrales de escorrentía para el área de recepción
En condición  1  el umbral vale   24.8  mm
En condición  2  el umbral vale   10.4  mm
En condición  3  el umbral vale    4.5  mm

     Umbrales de escorrentía para una unidad de terreno sistematizada
En condición  1  el umbral vale   10.4  mm
En condición  2  el umbral vale    4.4  mm
En condición  3  el umbral vale    1.9  mm
```

Figura 10: Volcado de pantalla de MODIPÉ 1.1

SALIDA TABULADA

PROGRAMA MODIPE
DATOS DE LA SISTEMATIZACION DEL TERRENO

	S en m²	N1	P0(1) en mm	N2	P0(2) en mm	N3	P0(3) en mm
LADERA ACTUAL	-----	85	9	93	4	97	2
AREA DE IMPLUVIO	9.0	85	9	93	4	97	2
AREA DE RECEPCION	1.0	67	25	83	10	92	5
UNIDAD SISTEMATIZADA	10.0	83	10	92	4	96	2

S = superficie
N(i) = número de curva [en condición de humedad i]
P0(i)= umbral de escorrentía [en condición de humedad i]

CAPACIDAD DE EMBALSE DEL AREA DE RECEPCION: 0.0 l

Figura 11: Volcado de pantalla de MODIPÉ 1.1

RESULTADOS DEL PROGRAMA

CAPA = 150 litros

```
        Número de curva de la ladera actual en condición 2 :  93.0
Area de impluvio ( en m² ):      9.0 ||  Número de curva en condición 2 : 93.0
Area de recepción ( en m² ):     1.0 ||  Número de curva en condición 2 : 83.0
          Capacidad de embalse del area de recepción ( en l ):  150.0
     Umbrales de escorrentía en la ladera actual
En condición  1  el umbral vale    9.1  mm
En condición  2  el umbral vale    3.8  mm
En condición  3  el umbral vale    1.7  mm

     Umbrales de escorrentía para el área de impluvio
En condición  1  el umbral vale    9.1  mm
En condición  2  el umbral vale    3.8  mm
En condición  3  el umbral vale    1.7  mm

     Umbrales de escorrentía para el área de recepción
En condición  1  el umbral vale   24.8  mm
En condición  2  el umbral vale   10.4  mm
En condición  3  el umbral vale    4.5  mm

     Umbrales de escorrentía para una unidad de terreno sistematizada
En condición  1  el umbral vale   46.8  mm
En condición  2  el umbral vale   31.6  mm
En condición  3  el umbral vale   23.6  mm
```

Figura 12: Volcado de pantalla de MODIPÉ 1.1

SALIDA TABULADA

PROGRAMA MODIPE
DATOS DE LA SISTEMATIZACION DEL TERRENO

	S en m²	N1	P0(1) en mm	N2	P0(2) en mm	N3	P0(3) en mm
LADERA ACTUAL	-----	85	9	93	4	97	2
AREA DE IMPLUVIO	9.0	85	9	93	4	97	2
AREA DE RECEPCION	1.0	67	25	83	10	92	5
UNIDAD SISTEMATIZADA	10.0	52	47	62	32	68	24

S = superficie
N(i) = número de curva [en condición de humedad i]
P0(i)= umbral de escorrentía [en condición de humedad i]

CAPACIDAD DE EMBALSE DEL AREA DE RECEPCION: 150.0 l

Figura 13: Volcado de pantalla de MODIPÉ 1.1

R1: El apartado primero se resuelve numéricamente del siguiente modo:

$$NI(1) = \frac{4{,}2 \cdot NI(2)}{10 - 0{,}058 \cdot NI(2)} = \frac{4{,}2 \cdot 93}{10 - 0{,}058 \cdot 93} = 84{,}8 \approx 85$$ [redondeando a un número entero]

$$NI(3) = \frac{23 \cdot NI(2)}{10 + 0{,}13 \cdot NI(2)} = \frac{23 \cdot 93}{10 + 0{,}13 \cdot 93} = 96{,}8 \approx 97$$ [Compárese con la figura 11.]

El umbral de escorrentía vale: $P_0 = \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot N}{N}$.

Luego las precipitaciones mínimas (=los umbrales de escorrentía del área de impluvio) valdrán:

$$P1(1) = \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot 84{,}8}{84{,}8} = 9{,}1 \ mm$$ [condición de humedad $J = 1$; suelo seco]

$$P1(2) = \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot 93}{93} = 3{,}8 \ mm$$ [condiciones medias de humedad; $J = 2$]

$$P1(3) = \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot 96{,}8}{96{,}8} = 1{,}7 \ mm$$ [condición de humedad $J = 3$; suelo húmedo]

Estos valores coinciden con los resultados obtenidos por el programa MODIPÉ. (compárense con los datos de la figura 10.)

R2: Si hacemos los mismos cálculos con el número de curva del área de recepción (*NR*), tenemos:

$NR(2) = 83$ [dato del enunciado] $\Rightarrow$ $NR(1) = 67{,}2$ y $NR(3) = 91{,}8$

El número de curva medio (entre el área de impluvio y el área de recepción) valdrá:

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

Para las tres condiciones de humedad (J = 1, 2 y 3) que contempla el método del número de curva:

$$NM(1) = \frac{84{,}8 \cdot 9 + 67{,}2 \cdot 1}{10} = 83 \quad \Rightarrow \quad P0(1) = P2(1) = \frac{5080 - 50{,}8 \cdot 83}{83} = 10{,}4 \ mm$$

(precipitación límite para alcorque nulo sobre suelo seco, dato que coincide con el de la figura 10)

$$NM(2) = \frac{93{\cdot}9 + 83{\cdot}1}{10} = 92 \quad \Rightarrow \quad P0(2) = P2(2) = 4{,}4 \ \ mm$$ (precipitación límite para alcorque nulo en condiciones medias de humedad)

$$NM(3) = \frac{96{,}8{\cdot}9 + 91{,}8{\cdot}1}{10} = 96{,}3 \quad \Rightarrow \quad P0(3) = P2(3) = 1{,}95 \ \ mm$$ (precipitación límite para alcorque nulo sobre suelo húmedo; valor que coincide con el que aparece en la figura 10.)

R3: El apartado tercero es más complejo. Para obtener las precipitaciones límites si el alcorque no es nulo (*CAPA* > 0) hay que resolver la siguiente ecuación:

$$MAX = CAPA \quad \Leftrightarrow \quad CAPA = \frac{(P - P0(J))^2}{P + 4{\cdot}P0(J)} \cdot (S_1 + S_2)$$ (si NI ≥ NR, como es el caso[4])

Operando se llega a una ecuación de segundo grado en *P* que nos da las precipitaciones límites (*P2*(*J*)):

$$P^2 - \frac{2{\cdot}P0(J){\cdot}(S_1 + S_2) + CAPA}{S_1 + S_2} \cdot P - \frac{4{\cdot}CAPA{\cdot}P0(J)}{S_1 + S_2} + (P0(J))^2 = 0$$

$$P = P2(J) = P0(J) + \frac{CAPA}{2{\cdot}(S_1 + S_2)} + \sqrt{\left[P0(J) + \frac{CAPA}{2{\cdot}(S_1 + S_2)}\right]^2 + \frac{4{\cdot}CAPA{\cdot}P0(J)}{S_1 + S_2} - (P0(J))^2}$$

Así, tenemos:

$$P2(1) = 10{,}4 + 7{,}5 + \sqrt{17{,}9^2 + \frac{4{\cdot}150{\cdot}10{,}4}{10} - 10{,}4^2} = 46{,}8 \ \ mm$$ (redondeando: 47 mm)

$$P2(2) = 4{,}4 + \frac{150}{2{\cdot}10} + \sqrt{11{,}9^2 + \frac{4{\cdot}150{\cdot}4{,}4}{10} - 4{,}4^2} = 31{,}6 \ \ mm$$ (redondeando: 32 mm)

$$P2(3) = 1{,}95 + 7{,}5 + \sqrt{9{,}45^2 + \frac{4{\cdot}150{\cdot}1{,}95}{10} - 1{,}95^2} = 23{,}6 \ \ l/m^2$$ (redondeando: 24 mm)

Estos tres últimos valores coinciden con los ofrecidos por el programa MODIPÉ (figuras 12 y 13).

[4] Nota: En el caso de que *NI* < *NR*, para calcular *P2* (el umbral de escorrentía de la unidad sistematizada o precipitación límite), hay que resolver una ecuación de tercer grado en *P*. Esta ecuación figura en el manual de usuario del programa MODIPÉ (Martínez de Azagra, 2004; p. 15) así como en la publicación original del modelo (Martínez de Azagra, 1996; p. 53) y en el formulario de este trabajo.

R4 a R6: **EJEMPLO de SALIDA de RESULTADOS**

(para *CAPA* = 150 litros ; mes de febrero (año 2005))

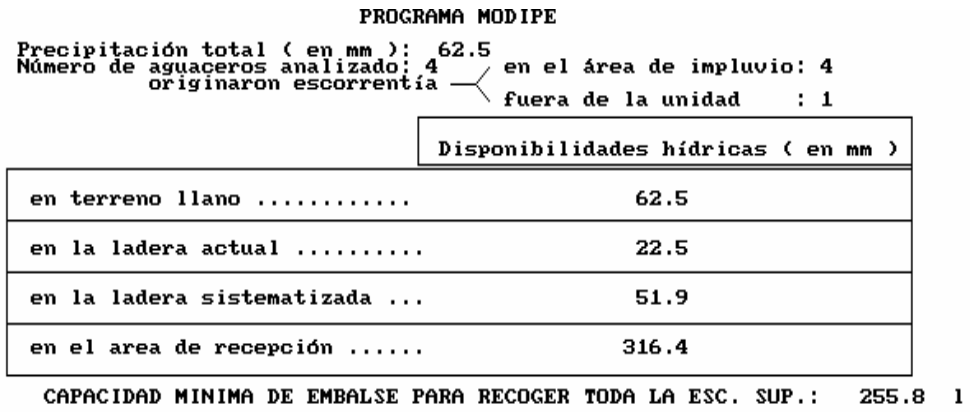


Figura 14: Volcado de pantalla de MODIPÉ 1.1

Tabla 2: Resumen de resultados

MES	TERRENO LLANO *P* (en mm)	LADERA ACTUAL *ANTES* (mm)	LADERA ACTUAL *C* (adimensional)	*CAPA* = 0 litros *DESP* (en mm)	*CAPA* = 0 litros *PROM* (en mm)	*CAPA* = 150 litros *DESP* (en mm)	*CAPA* = 150 litros *PROM* (en mm)
FEBRERO	62,5	22,5	0,64	45,2	24,8	316,4	51,9
MARZO	49	24,2	0,51	44,5	26,3	202,4	42
ABRIL	19,8	19,75	≈ 0	20,1	19,8	20,1	19,8
MAYO	50	30,6	0,39	52,8	32,8	202,5	47,8
JUNIO	37	26,4	0,29	42,1	28	132,4	37
Σ (suma)	**218,3**	**123,4**	**0,44**	**204,7**	**131,7**	**873,8**	**198,5**

De acuerdo con los datos que ofrece MODIPÉ, con una trampa de agua de 255,8 litros (*CAPA* = 255,8 l) la microcuenca sería endorreica para todos los episodios de lluvia (figura 14).

R4 y R5:

Tabla 3: Incremento de la dotación de agua en la banqueta respecto del ….

CAPA (en litros)	… área de impluvio	… terreno llano
0	+ 81,3 l/m^2	– 13,6 l/m^2
150	+ 750,4 l/m^2	+ 655,5 l/m^2

Estos resultados se obtienen interpretando el significado de la última fila de la tabla 2:

$$81{,}3 = 204{,}7 - 123{,}4$$

$$-13{,}6 = 204{,}7 - 218{,}3$$

$$750{,}4 = 873{,}8 - 123{,}4$$

$$655{,}5 = 873{,}8 - 218{,}3$$

R7: El coeficiente de escorrentía medio si *CAPA* = 0 litros vale:

$$C = \frac{218{,}3 - 131{,}7}{218{,}3} = 0{,}396$$

de acuerdo con los datos de la tabla 2.

El coeficiente de escorrentía medio si *CAPA* = 150 litros vale:

$$C = \frac{218{,}3 - 198{,}5}{218{,}3} = 0{,}09$$

Es prácticamente nulo. Valdría cero siempre que *CAPA* fuese mayor o igual que 255,8 litros.

Ejercicio 5

Para diseñar la preparación del suelo de unas laderas se ha determinado: su número de curva actual (*NAC* = 90) y el número de curva del bosque que se quiere conseguir (N_{obj} = 60). Una posible preparación del terreno consiste en unas microcuencas con unos alcorque de gran capacidad, cuyo número de curva equivalente valga *NEQ* = 45. Responda razonadamente a las dos cuestiones siguientes:

1) ¿Tiene sentido practicar cosechas de agua en las laderas descritas?
2) ¿Le parece acertada la preparación del suelo indicada?

R1: Sí tiene sentido, ya que el número de curva de la ladera actual es muy elevado (*NAC* = 90), lo que hace que pueda haber mucho escurrimiento en esas laderas (sobre todo si el clima es torrencial: es decir, si llueve poco pero intensamente).

$$NAC = 90 \quad \Rightarrow \; PAC = \frac{5080 - 50{,}8 \cdot NAC}{NAC} = 5{,}64 \; mm$$

PAC es un umbral de escorrentía bastante bajo. Muchos aguaceros superarán este valor y generarán escorrentía con las consiguientes pérdidas de agua, suelo y nutrientes: ¡la desertificación está servida!

R2: No es una preparación del suelo conveniente puesto que el número de curva equivalente resulta menor que el del bosque a conseguir: $NEQ < N_{obj}$ (45 < 60). Desde el punto de vista ecológico, el movimiento de tierras es exagerado y –por lo tanto– inconveniente.

La precipitación límite de la preparación del suelo (*P2*) y el umbral de escorrentía del bosque objetivo (P_{bosque}) se calculan fácilmente:

$$NEQ = 45 \quad \Rightarrow \; P2 = \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot NEQ}{NEQ} = 62{,}1 \; mm$$

$$N_{obj} = 60 \quad \Rightarrow \; P_{bosque} = \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot N_{obj}}{N_{obj}} = 33{,}9 \; mm$$

Ejercicio 6

A continuación se ofrece la tabla principal de resultados del programa MODIPÉ (versión 1.1) para un ejemplo de simulación. Explique el significado de los dos datos subrayados de la tabla.

PROGRAMA MODIPE

Precipitación aguacero	Condición previa de humedad:
30.0 mm	2

	Disponibilidades hídricas (en mm)
en terreno llano	30.0
en la ladera actual	13.3
en la ladera sistematizada ...	30.0
en el area de recepción	180.0

CAPACIDAD MINIMA DE EMBALSE PARA RECOGER TODA LA ESC. SUP.: 160.3 l

R: Las disponibilidades hídricas del área de recepción (*DESP*) se corresponden con el volumen de agua infiltrado en el área de almacenamiento, como consecuencia del chubasco analizado (P = 30 mm, en condiciones medias de humedad: J = 2). Estas disponibilidades se calculan mediante la ecuación fundamental:

$DESP = P + E_{s1} - E_{s2}$
$DESP$ = 180 l/m^2 (>> P = 30 mm, gracias a la recolección de agua, gracias a E_{s1})

La capacidad mínima de embalse para recoger toda la escorrentía superficial generada por el aguacero en la unidad sistematizada vale 160,3 litros:

CAPAL = 160,3 l

Se refiere a la capacidad mínima del alcorque (= microembalse) en el área de recepción para que la preparación del suelo resulte endorreica con la lluvia analizada (P = 30 mm y condiciones medias de humedad antecedente (J = 2))

Puesto que la disponibilidad hídrica promedio en la ladera sistematizada coincide con la precipitación del aguacero (30 l/m^2), se puede afirmar: que la escorrentía que escapa de la unidad sistematizada es nula (E_{s2} = 0 mm) y que la trampa de agua es suficiente para lograr endorreísmo en este aguacero (*CAPA* ≥ *CAPAL*).

Ejercicio 7

A nivel hidrológico, la preparación del suelo efectuada en un erial para su repoblación forestal puede resumirse con los siguientes datos:

Número de curva inicial: 88
Tamaño del área de impluvio: 17 m^2
Tamaño del área de recepción: 3 m^2
Capacidad media de los alcorques: 400 litros
Número de curva del área de impluvio: 90
Número de curva del área de recepción: 92

1) Explique la razón por la cual el programa calcula una capacidad mínima de alcorque en situaciones como la descrita en este ejemplo numérico.

2) Al correr el programa MODIPÉ, salen los resultados que se ofrecen en la tabla adjunta nº 4 y que usted debe interpretar en relación a un aguacero de 15 l/m^2 para las tres condiciones de humedad posibles.

3) ¿Qué cantidad de agua aportará el área de impluvio si llueven los 15 mm sobre mojado (condición 3 de humedad antecedente)?

Tabla 4: Umbrales de escorrentía en distintas situaciones y lugares

	P_0 (1) [en mm]	P_0 (2) [en mm]	P_0 (3) [en mm]
Ladera actual	16,5	6,9	3,0
Área de impluvio	13,4	5,6	2,5
Área de recepción	10,5	4,4	1,9
Unidad sistematizada	60,3	40,8	30,7

R1: Al ser el número de curva del área de recepción (*NR*) mayor que el número de curva del área de impluvio (*NI*) existirá la tendencia de que se inviertan las tornas, es decir: de que el área de recepción actúe como área de impluvio. Para evitar este contrasentido, el programa calcula una capacidad mínima de alcorque (*CAPMIN*) de manera que E_{s1} y E_{s2} se produzcan al mismo tiempo.

$$\text{Si } NR > NI \quad \Rightarrow \quad \text{necesidad de } CAPMIN$$

Con los datos de la preparación del suelo, en este caso *CAPMIN* = 0,5 litros, como se comprueba al correr el programa MODIPÉ. Sin embargo, cuando el número de curva del área de recepción sea muy superior al número de curva del área de impluvio (*NR* >> *NI*), el valor de *CAPMIN* puede salir elevado.

R2: a) Respecto de la ladera actual

La precipitación de 15 mm es totalmente aprovechable si cae sobre suelo muy seco (condición 1 de humedad) pues *PAC*(1) = 16,5 mm (> 15 l/m^2).

En las demás condiciones de humedad (2 y 3) se producirá escorrentía fuera de la ladera ya que $P > PAC$. [*PAC*(2) = 6,9 mm y *PAC*(3) = 3,0 mm]

b) Respecto del área de impluvio

Se trata, para los tres casos de humedad, de una precipitación mayor que la precipitación mínima (*P1*)

$$15 \text{ l/m}^2 > P1$$

$$[P1(1) = 13{,}4 \text{ mm},\ P1(2) = 5{,}6 \text{ mm},\ P1(3) = 2{,}5 \text{ mm}]$$

Por lo tanto y en las tres situaciones, la precipitación genera escorrentía superficial y –consecuentemente– cosechas de agua.

c) Área de recepción

Aunque ya ha sido comentado con anterioridad, si no existiese una trampa de agua (*CAPA* = 400 litros > *CAPMIN*) el área de recepción actuaría como área de impluvio al ser sus umbrales de escorrentía menores que los del área de captación.

d) Respecto de la unidad sistematizada

Se trata de una precipitación idónea para las tres condiciones de humedad: el área de impluvio aporta escorrentía, que el área de recepción aprovecha al cien por cien. La disponibilidad hídrica media en la ladera coincidirá con la precipitación (15 l/m^2) ya que no se alcanza la precipitación límite (*P2*)

$$[P2(1) = 60{,}3 \text{ mm},\ P2(2) = 40{,}8 \text{ mm},\ P2(3) = 30{,}7 \text{ mm} > P = 15 \text{ mm}]$$

R3: La escorrentía en el área de impluvio (E_{s1}) se calcula conforme al método del número de curva mediante la expresión:

$$E_{s1} = \frac{(P - P1)^2}{P + 4 \cdot P1}$$

Sustituyendo valores:

$$E_{s1} = \frac{(15 - 2{,}5)^2}{15 + 4 \cdot 2{,}5} = 6{,}25 \ \ mm$$

Para conocer la cantidad de agua (en litros) que aporta el área de captación, basta con multiplicar E_{s1} por su tamaño:

$$V = E_{s1} \cdot S_1 = 6{,}25 \cdot 17 = 106{,}25 \ \ l$$

Casos prácticos

Ejemplo 1

Las microcuencas Negarim (del hebreo '*neger*' que significa escorrentía) son unidades sistematizadas con forma romboidal o cuadrada rodeadas por pequeños caballones de tierra con un hoyo de infiltración en el vértice inferior de cada una. La escorrentía provocada por los aguaceros es retenida y almacenada en el hoyo de infiltración. Estas microcuencas se usan principalmente para el cultivo de árboles y arbustos tales como almendros, pistachos, parras, olivos, higueras o algarrobos en numerosas zonas desérticas y subdesérticas de la Tierra.

Cada microcuenca consiste en un área de captación y un hoyo de infiltración. La forma de cada unidad suele ser cuadrada, pero la apariencia en planta es la de una red romboidal con hoyos de infiltración en los ángulos inferiores. Véanse las dos figuras adjuntas.

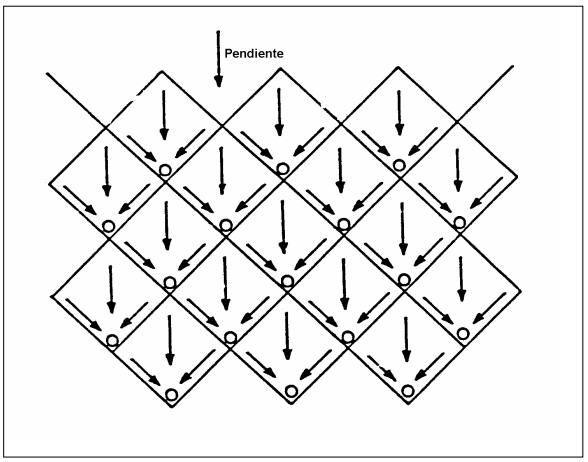


Figura 15: Configuración general de las microcuencas Negarim

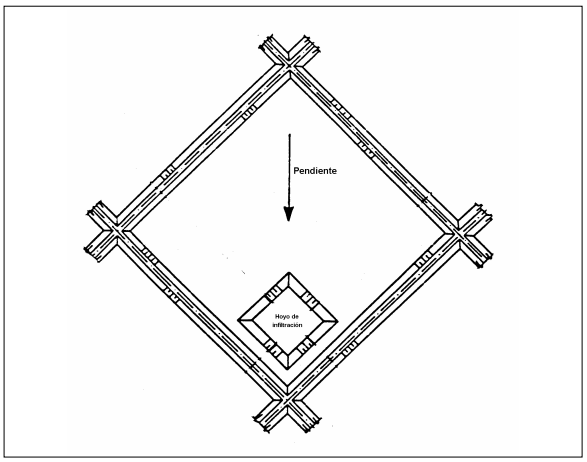


Figura 16: Detalle de una microcuenca Negarim

El área de cada unidad puede determinarse mediante un balance hídrico, estimando la escorrentía y los requerimientos hídricos de las plantas a cultivar. El tamaño de la microcuenca varía tradicionalmente entre 9 y 225 m^2, dependiendo del lugar y la especie plantada. En la tabla adjunta nº 5 se resumen algunos detalles constructivos de estas microcuencas (Critchley & Siegert, 1991):

Tabla 5: Geometría de las microcuencas Negarim

TAMAÑO DE LA UNIDAD lados y área	TAMAÑO DEL HOYO DE INFILTRACIÓN lados · profundidad	UNIDADES/ha
3 m x 3 m = 9 m^2	1,4 x 1,4 x 0,4	1.110
4 m x 4 m = 16 m^2	1,6 x 1,6 x 0,4	625
5 m x 5 m = 25 m^2	1,8 x 1,8 x 0,4	400
6 m x 6 m =36 m^2	1,9 x 1,9 x 0,4	275
8 m x 8 m = 64 m^2	2,2 x 2,2 x 0,4	155
10 m x 10 m = 100 m^2	2,5 x 2,5 x 0,4	100
12 m x 12 m = 144 m^2	2,8 x 2,8 x 0,4	70
15 m x 15 m = 225 m^2	3,0 x 3,0 x 0,4	45

Para simular el comportamiento hidrológico de una microcuenca Negarim de 144 m^2 disponemos de la siguiente información: Laderas prácticamente desnudas;

suelos muy arcillosos y profundos con muy poca materia orgánica, vegetación escasísima y dispersa formada por matorral subdesértico del Néguev (*Tamarix aphylla, Acacia radiana, Retama raetam*, etc.). La serie temporal de precipitaciones máximas diarias en la región se ajusta muy bien a la distribución de Gumbel, lo que nos permite elaborar la siguiente tabla:

Tabla 6: Precipitaciones máximas diarias con su periodo de recurrencia asociado

Periodo de retorno	**Aguacero [en mm]**
2 años	19,8
5 años	30,0
10 años	36,7
15 años	40,5
20 años	43,1
30 años	46,9
40 años	49,5
50 años	51,5
100 años	57,8

1) ¿Qué datos de entrada introduciría en el programa MODIPÉ para resolver la cuestión?
2) ¿Qué dato de salida compararía con la información que ofrece la última tabla n.º 6?
3) ¿En qué sentido pueden influir los pequeños caballones de tierra (de altura inferior a 25 cm) que rodean a cada microcuenca?
4) Amplíe la tabla de los datos geométricos de las microcuencas Negarim incorporando una columna adicional con el volumen de alcorque por unidad de superficie de la sistematización.

R1: Los datos necesarios para responder a esta pregunta se extraen de la tabla n.º 5 (penúltima fila).

Área de recepción = $S_2 = 2{,}8 \cdot 2{,}8 = 7{,}84$ m^2

Área de impluvio = $S_1 = S - S_2 = 144 - S_2 = 136{,}16$ m^2

Número de curva del área de impluvio = *NI* = nº de curva de la ladera actual = *NAC*

Yendo a la tabla de zonas áridas y semiáridas (apéndice 2) o utilizando el programa NumCur, se tiene para un herbazal con algo de matorral y condición hidrológica pobre en un suelo de tipo D:

$NAC = NI = 93$

Número de curva del área de recepción = *NR*

A falta de ensayos de campo y para estar del lado de la seguridad, el método general aconseja trabajar con la siguiente desigualdad: $NR \geq NI$

Luego $NR = 93$ puede ser una buena solución.

Nota: $NR < NI$ expresa que la preparación del suelo en el área de recepción es favorable a la infiltración, lo que puede tacharse de optimista (pues con el laboreo del suelo se elimina la vegetación, evolucionando el área de recepción hacia un barbecho. Cierto es que si la labor se realiza a tempero, se estará mullendo y profundizando el suelo, pero en general y para estar del lado de la seguridad en los cálculos, aconsejamos: $NR \geq NI$)

$CAPA = 2{,}8 \cdot 2{,}8 \cdot 0{,}4 = 3{,}136\ m^3 = 3.136$ litros

R2: Hay que comparar la precipitación límite (= el umbral de escorrentía de la unidad sistematizada) con los aguaceros de la zona para conocer la garantía de endorreísmo que ofrece la microcuenca Negarim considerada. Dicha precipitación límite vale 37,8 mm (para unas condiciones medias de humedad antecedente), lo que se corresponde con un periodo de retorno superior a 10 años (véase la tabla 6 y la figura 17).

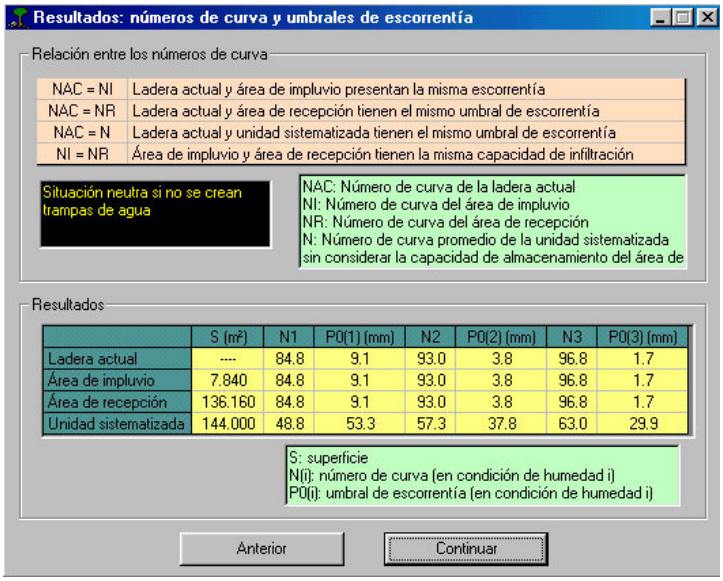


Figura 17: Datos que ofrece MODIPÉ (2.0) sobre la preparación del suelo considerada

R3: Los caballones de tierra que bordean la microcuenca aumentan la probabilidad de endorreísmo ante un aguacero, pues incrementan *CAPA* de forma considerable. A la profundidad del hoyo de infiltración (H = 0,4 m) habrá que agregar la altura que tienen los caballones de tierra perimetrales (h ≤ 0,25 m), si se desea calcular *CAPA* considerando tal circunstancia; es decir: $CAPA \approx S_2 \cdot (H + h)$

Conviene señalar que las microcuencas Negarim no plantean una sistematización secundaria por lo que la necesidad de asegurar endorreísmo es mayor en este caso que en las preparaciones del suelo que prevén la evacuación ordenada de los "excedentes" de agua.

Desde un punto de vista conceptual, también puede decirse que estos caballones refuerzan la validez de la hipótesis de independencia del modelo MODIPÉ.

R4: El volumen de alcorque por unidad de superficie de la sistematización (*CAPA*/*S*) sirve para conocer la precipitación límite de la microcuenca, en el caso de que ésta sea totalmente impermeable ($NI = NR = 100$). En principio cabe suponer que las distintas microcuencas Negarim tengan precipitaciones límites similares. Sin embargo, en la tabla adjunta número 7 se observa una clara discrepancia en cuanto a los valores de

(*CAPA*/*S*), que van desde los 16 mm hasta los 87,1 mm. Ello nos da idea del puro empirismo que rige este tipo de preparaciones del suelo.

Mediante cálculos sencillos puede mejorarse el diseño de las trampas de agua. El tamaño del hoyo de infiltración es exagerado en las microcuencas menores mientras que resulta escaso para las microcuencas mayores. Una precipitación límite general próxima a 50 mm ($P2 \approx CAPA/S = 50$ l/m^2) nos parece acertada para la mayor parte de las situaciones, lo que se consigue alterando los lados del hoyo de infiltración, tal y como se señala en la tabla número 8.

Tabla 7: Datos técnicos tradicionales de las microcuencas Negarim

TAMAÑO DE LA UNIDAD lados y área	TAMAÑO DEL HOYO DE INFILTRACIÓN lados · profundidad	UNIDADES/ha	*CAPA / S* (mm)
3 m x 3 m = 9 m^2	1,4 x 1,4 x 0,4	1.110	87,1
4 m x 4 m = 16 m^2	1,6 x 1,6 x 0,4	625	64,0
5 m x 5 m = 25 m^2	1,8 x 1,8 x 0,4	400	51,8
6 m x 6 m =36 m^2	1,9 x 1,9 x 0,4	275	40,1
8 m x 8 m = 64 m^2	2,2 x 2,2 x 0,4	155	30,3
10 m x 10 m = 100 m^2	2,5 x 2,5 x 0,4	100	25,0
12 m x 12 m = 144 m^2	2,8 x 2,8 x 0,4	70	21,8
15 m x 15 m = 225 m^2	3,0 x 3,0 x 0,4	45	16,0

Tabla 8: Tamaño de *CAPA* ajustado a una precipitación límite próxima a 50 mm

TAMAÑO DE LA UNIDAD lados y área	TAMAÑO DEL HOYO DE INFILTRACIÓN lados · profundidad	UNIDADES/ha	*CAPA / S* (mm)
3 m x 3 m = 9 m^2	1,1 x 1,1 x 0,4	1.110	53,8
4 m x 4 m = 16 m^2	1,4 x 1,4 x 0,4	625	49,0
5 m x 5 m = 25 m^2	1,8 x 1,8 x 0,4	400	51,8
6 m x 6 m =36 m^2	2,2 x 2,2 x 0,4	275	53,8
8 m x 8 m = 64 m^2	2,8 x 2,8 x 0,4	155	49,0
10 m x 10 m = 100 m^2	3,5 x 3,5 x 0,4	100	49,0
12 m x 12 m = 144 m^2	4,0 x 4,0 x 0,4	70	44,4
15 m x 15 m = 225 m^2	5,0 x 5,0 x 0,4	45	44,4

Ejemplo 2

En unas laderas con claros síntomas de desertificación por aridez edáfica se plantean dos preparaciones del suelo diferentes. El efecto hidrológico de ambas según el modelo MODIPÉ queda reflejado en las siguientes salidas del programa (versión 1.1):

PREPARACIÓN I

PROGRAMA MODIPE
DATOS DE LA SISTEMATIZACION DEL TERRENO

	S en m²	N1	P0(1) en mm	N2	P0(2) en mm	N3	P0(3) en mm
LADERA ACTUAL	-----	79	13	90	6	95	2
AREA DE IMPLUVIO	18.0	85	9	93	4	97	2
AREA DE RECEPCION	2.0	79	13	90	6	95	2
UNIDAD SISTEMATIZADA	20.0	55	41	65	27	72	20

S = superficie
N(i) = número de curva [en condición de humedad i]
P0(i)= umbral de escorrentía [en condición de humedad i]

CAPACIDAD DE EMBALSE DEL AREA DE RECEPCION: 250.0 l

PREPARACIÓN II

PROGRAMA MODIPE
DATOS DE LA SISTEMATIZACION DEL TERRENO

	S en m²	N1	P0(1) en mm	N2	P0(2) en mm	N3	P0(3) en mm
LADERA ACTUAL	-----	74	18	87	8	94	3
AREA DE IMPLUVIO	9.0	74	18	87	8	94	3
AREA DE RECEPCION	1.0	74	18	87	8	94	3
UNIDAD SISTEMATIZADA	10.0	52	47	65	28	74	18

S = superficie
N(i) = número de curva [en condición de humedad i]
P0(i)= umbral de escorrentía [en condición de humedad i]

CAPACIDAD DE EMBALSE DEL AREA DE RECEPCION: 70.0 l

así como en la siguiente tabla resumen:

Tabla 9: Resumen de resultados del modelo MODIPÉ

Preparación	S_1 (en m^2)	S_2 (en m^2)	*NAC*	*NI*	*NR*	*CAPA* (en litros)	*NEQ*
I	18	2	90	93	90	250	65
II	9	1	87	87	87	70	65

Responda de manera razonada:

1) ¿Cuál de las dos laderas está más degradada desde el punto de vista hidrológico?
2) ¿Cuál de las dos preparaciones del suelo puede conseguir más cosechas de agua por unidad de superficie?
3) ¿En cuál de ellas se asegura el endorreísmo mejor ante un aguacero estival aislado?
4) ¿Se mantiene esa tónica si llueve sobre mojado?
5) ¿Cuál de las dos preparaciones del suelo provoca un impacto paisajístico mayor?
6) Si sólo se repoblase en el área de recepción: ¿qué densidad de planta estaríamos introduciendo en cada caso?

R1: La ladera correspondiente a la preparación I está más degradada, pues tiene un número de curva mayor (o lo que es lo mismo: unos umbrales de escorrentía menores). Si nos fijamos en las condiciones medias de humedad ($J = 2$):

$NAC(2) = 90$ frente a 87
$PAC(2) = 6$ mm frente a 8 mm en la ladera II

La misma tónica se observa si nos fijamos en las otras dos condiciones de humedad que considera el método del número de curva ($J = 1$ [suelo seco] y $J = 3$ [suelo húmedo]).

R2: La preparación I pues el número de curva (*NI*) resulta más elevado (93 frente a 87, si nos referimos a condiciones medias de humedad), lo que implica una mayor eficiencia de escurrido.

$$P1 = 0{,}2 \cdot \frac{25.400 - 254 \cdot NI}{NI} = \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot NI}{NI}$$

En el primer caso, el umbral de escorrentía del área de impluvio (*P1*) vale 3,8 mm.
Con la segunda preparación, *P1* = 7,6 mm por lo que su eficiencia de escurrido es menor.

R3: En pleno verano y bajo clima mediterráneo estaremos en condición $J = 1$ de humedad (es decir: suelo seco o muy seco).

La preparación II queda caracterizada por un *NEQ*(1) de 52 (precipitación límite igual a 47 l/m^2) mientras que la sistematización I posee un *NEQ*(1) superior (55; precipitación límite = 41 l/m^2), luego es la preparación II la que proporciona más probabilidad de endorreísmo en verano.

R4: Si llueve sobre mojado estaremos en la condición 3 de humedad antecedente. Para esta situación se invierten las tornas (aunque muy ligeramente), como puede apreciarse en la tabla siguiente (extraída de las salidas del programa MODIPÉ):

Tabla 10: Números de curva equivalentes y precipitaciones límite (para $J = 3$)

Preparación	***NEQ*(3)**	***P2*(3)** (en mm)
I	72	20
II	74	18

La preparación I posee una precipitación límite más alta (20 mm frente a 18 l/m^2).

Nota: Obsérvese en las salidas de MODIPÉ (1.1) que para condiciones medias de humedad (J = 2) ambas preparaciones poseen el mismo número de curva equivalente (NEQ = 65) y –con ello– igual precipitación límite ($P2$ = 27 o 28 l/m^2). La no concordancia de este último dato se debe a los redondeos del programa en la salida de resultados. Si se utiliza la versión (2.0) se puede afinar. Así, los datos que facilita MODIPÉ (2.0) son los siguientes:

Tabla 11: Números de curva equivalentes y precipitaciones límite (para J = 2)

Preparación	***NEQ*(2)**	***P2*(2)** (en mm)
I	65,1	27,3
II	64,7	27,8

Al redondear a números enteros se obtienen las salidas de la versión 1.1.

R5: La preparación I provoca un relieve más artificial. Basta con analizar el tamaño individual de los microembalses (250 litros frente a 70 litros) o –mejor aún– el volumen de alcorque por metro cuadrado de microcuenca: $250/20 = 12{,}5\ l/m^2$ frente a $70/10 = 7\ l/m^2$, para comprobarlo.

R6: En las sistematizaciones primarias plenas, la densidad de repoblación (n) se calcula mediante la expresión:

$$n = \frac{10.000}{S_1 + S_2} = 10.000/S$$

Luego:

Preparación I $\longrightarrow$ $n = 10.000/20 =$ 500 pies/ha

Preparación II $\longrightarrow$ $n = 10.000/10 =$ 1.000 pies/ha

Ejemplo 3

Los valores medios de la geometría de un aterrazado en contrapendiente se dan a continuación:

- pendiente de la ladera, $\lambda = 45\%$
- anchura de la explanación, $a = 2{,}5$ m
- talud en terraplén, $\tau = 60\%$
- talud en desmonte, $\delta = 130\%$
- contrapendiente de la explanación, $\varepsilon = 5\%$
- distancia horizontal entre los ejes de dos terrazas consecutivas, $D = 10$ m

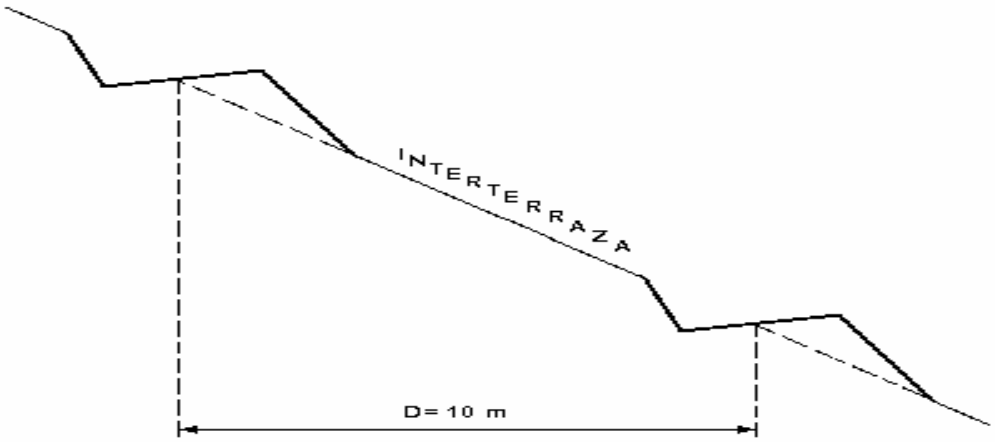


Figura 18: Sección de la ladera según una línea de máxima pendiente

Se proyecta una densidad de repoblación de 1.000 pies/ha. La mitad de la planta se va a situar en las plataformas de las terrazas. La otra mitad de los brinzales se plantará en la interterraza, realizando hoyos manuales sin alcorque. El número de marras que se produzca en ambas zonas puede servir de orientación para decidir futuros métodos de preparación del suelo en la región.

1) Calcule la longitud total de terraza a abrir en una hectárea.
2) Fije el marco de plantación.
3) Obtenga la sección mojada máxima de la terraza.
4) Halle el área de impluvio, el área de recepción y la capacidad de embalse que corresponden a una planta en la terraza.
5) Obtenga con ayuda del programa informático MODIPÉ la precipitación límite y su número de curva equivalente en condiciones medias de humedad, sabiendo que: $NI = 85$ y $NR = 87$.

R1: Este apartado no se refiere específicamente al modelo MODIPÉ sino que toma en consideración cuestiones básicas sobre la geometría del aterrazado (que pueden consultarse en Serrada (1993), García Salmerón (1995) o Pemán & Navarro (1998), por ejemplo).
La ecuación que resuelve es:

$$L \approx \frac{10.000}{D}$$

En este caso particular:

$$L = 10.000 \diagup 10 = 1.000 \ m$$

Luego hay que abrir una longitud de 1 km de terraza por hectárea.

R2: Tampoco este apartado se refiere a MODIPÉ sino a la geometría general de la plantación con relación al aterrazado.

La ecuación geométrica que resuelve es:

$$e \cdot D \cdot n_t = 10.000 \cdot n$$

siendo:

e = equidistancia entre plantas dentro de una línea de plantación (en m)
D = distancia horizontal entre dos terrazas consecutivas (en m)
n_t = densidad de repoblación en las terrazas (en pies/ha)
n = número de líneas de plantación incluidas en cada plataforma

Por los datos del enunciado conocemos D, n_t y n de manera que podemos deducir e.

D = 10 m
n_t = 500 pies/ha (los 500 pies/ha restantes se plantan en la interterraza)
n = 1 (una línea de plantación en cada terraza)

Luego: e = 2 m. La equidistancia entre plantas dentro de la terraza debe valer dos metros.

El marco de plantación en las terrazas es $e \cdot D = 2 \cdot 10$ m^2. A este marco se superpone otro equivalente en las interterrazas (véase la figura 19) con lo que queda un marco global de $2 \cdot 5$ m^2.

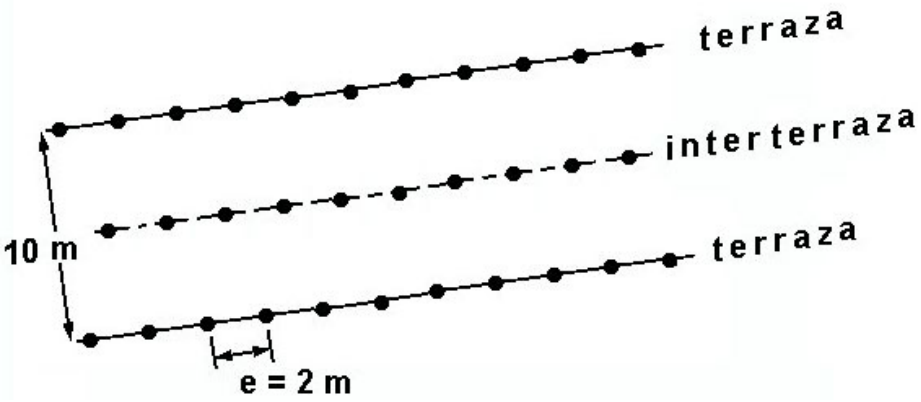


Figura 19: Vista esquemática en planta de tres líneas de repoblación

R3: La obtención de la sección mojada máxima es un ejercicio con relaciones trigonométricas sencillas pero algo engorrosas de resolver (véase la figura 20).

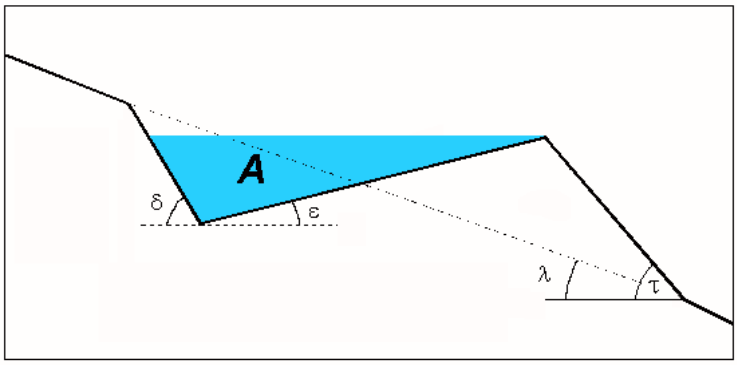


Figura 20: Terraza en contrapendiente con su sección mojada máxima (*A*) señalando los cuatro ángulos que la definen

Esta es la razón por la cual lo más práctico resulta utilizar el programa TERRAZAS (que puede descargarse en nuestra página web: *www.oasificacion.com*). A continuación se ofrecen sus resultados, obtenidos por volcado de pantalla.

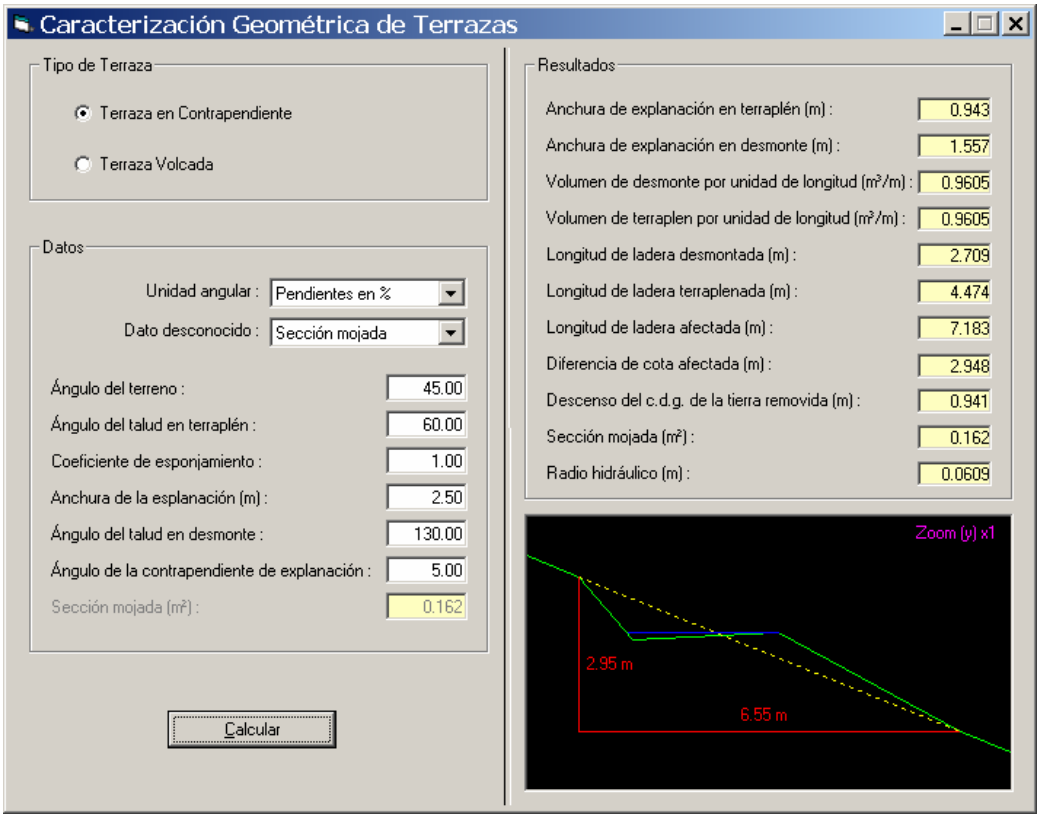


Figura 21: Volcado de pantalla del programa Terraza

Analizando los datos de esta pantalla encontramos el valor de la sección mojada máxima (cuando el resguardo es nulo), a saber: A = 0,162 m^2, dato que precisaremos para estimar *CAPA* (el tamaño del microembalse lineal perfilado con la terraza en contrapendiente).

Nota: La expresión que calcula *A* todavía es relativamente sencilla, lo que no ocurre con otras dimensiones de la geometría de una terraza. Para la obtención de tales magnitudes aconsejamos usar el programa TERRAZAS.

A es el área de un triángulo. Trabajando con los ángulos en radianes, tenemos:

$$A = \tfrac{1}{2}\cdot base\cdot altura = \tfrac{1}{2}\cdot ancho\ superficial\cdot calado$$

$$A = \frac{1}{2}\cdot\left[\tan(\frac{\pi}{2}-\delta)\cdot a\cdot sen(\varepsilon)+a\cdot\cos(\varepsilon)\right]\cdot a\cdot sen(\varepsilon)$$

$$A = \frac{1}{2}\cdot a^2\cdot sen(\varepsilon)\cdot\left[\tan(\frac{\pi}{2}-\delta)\cdot sen(\varepsilon)+\cos(\varepsilon)\right]$$

$$A = \frac{1}{2}\cdot a^2\cdot sen(\varepsilon)\cdot\left[\cot g(\delta)\cdot sen(\varepsilon)+\cos(\varepsilon)\right]$$

$$A = \frac{a^2\times sen(\varepsilon)\times sen(\delta+\varepsilon)}{2\times sen(\delta)}$$

En este caso:

$a = 2{,}5$ m

$\tan(\varepsilon) = 5/100 \Leftrightarrow \varepsilon = 0{,}0499583$ rad

$\tan(\delta) = 130/100 \Leftrightarrow \delta = 0{,}9151007$ rad

Luego:

$$A = \frac{2{,}5^2\times sen(0{,}0499583)\times sen(0{,}9151007+0{,}0499583)}{2\times sen(0{,}9151007)} = 0{,}1618546\ \text{m}^2$$

R4: La unidad sistematizada ocupa una superficie de veinte metros cuadrados, ya que la plantación en la interterraza no afecta en los cálculos (pues allí se realizan hoyos manuales sin alcorque).

$$S = e\cdot D = 20\ \text{m}^2 = S_1 + S_2.$$

El área de recepción que corresponde a una planta (S_2) puede estimarse a partir de la anchura de explanación de la terraza (a) y de la equidistancia entre plantas (e):

$$S_2 \approx a\cdot e = 2{,}5\cdot 2 = 5\ \text{m}^2$$

A su vez, el área de impluvio se estima como diferencia entre el tamaño de la unidad sistematizada y el área de recepción:

$$S_1 = S - S_2 \approx 15\ \text{m}^2$$

El tamaño de la trampa de agua (*CAPA*) puede calcularse como producto de la sección mojada máxima ($A = 0{,}162\ \text{m}^2$) por la equidistancia (e):

$$CAPA \approx A\cdot e = 0{,}162\cdot 2 = 0{,}324\ \text{m}^3 = 324\ \text{litros}$$

R5: Al utilizar el programa informático MODIPÉ (2.0) nos quedan los siguientes resultados:

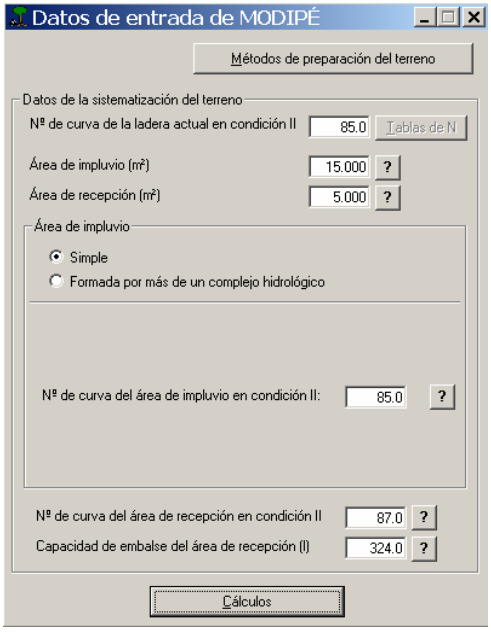
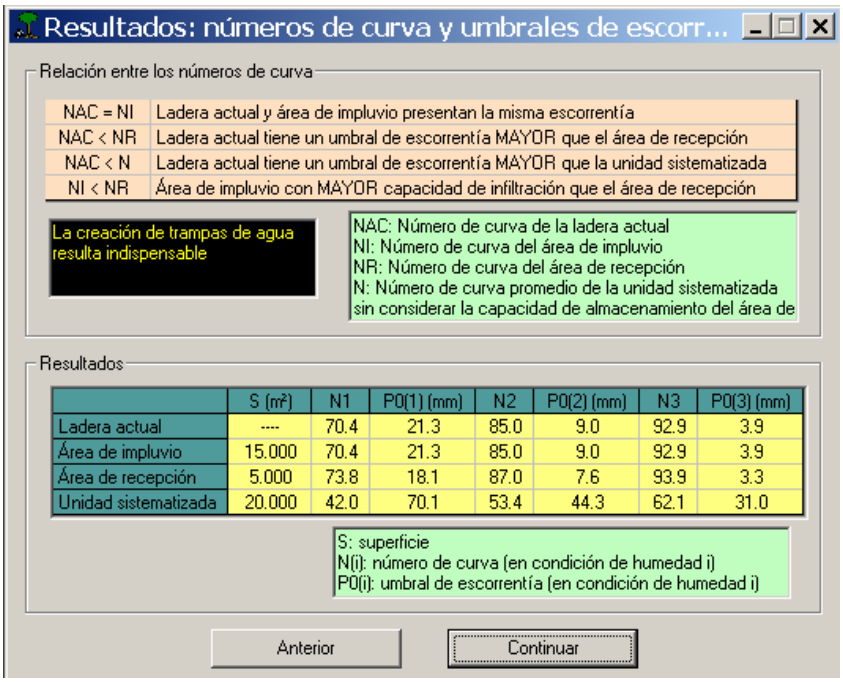


Figura 22: Datos de entrada al programa MODIPÉ



	S (m²)	N1	P0(1) (mm)	N2	P0(2) (mm)	N3	P0(3) (mm)
Ladera actual	----	70.4	21.3	85.0	9.0	92.9	3.9
Área de impluvio	15.000	70.4	21.3	85.0	9.0	92.9	3.9
Área de recepción	5.000	73.8	18.1	87.0	7.6	93.9	3.3
Unidad sistematizada	20.000	42.0	70.1	53.4	44.3	62.1	31.0

Figura 23: Volcado de pantalla con los resultados

En la tabla de la figura 23 vemos que la precipitación límite en condiciones medias de humedad vale 44,3 mm, siendo el número de curva equivalente 53,4.

$$P2(2) = 44{,}3 \text{ l/m}^2$$

$$NEQ(2) = 53{,}4 = \frac{5.080}{P2 + 50{,}8}$$

Ejemplo 4

En España, una preparación del suelo frecuente desde la aparición de los tractores con cadenas y durante los años 70 a 90 del siglo pasado ha sido el aterrazado con subsolado. En este ejercicio se estudia un caso práctico referido a unas cuestas repobladas en el invierno de 1988/89 con pino piñonero (*Pinus pinea*) y encina (*Quercus ilex rotundifolia*) en Reinoso de Cerrato (Palencia, España)

La ladera tiene una pendiente media del 40%. La vegetación (antes de la intervención) era fundamentalmente herbácea con una cobertura media del 60% creciendo sobre un litosuelo formado en unas margas yesosas bastante impermeables.

La intervención proyectada consistió en abrir unas terrazas anchas (de 3 m de explanación) con una contrapendiente del 5% mediante un tiltdozer yendo según curvas de nivel (sin previo replanteo topográfico; para lo cual se contrató a un tractorista *experimentado*).

Por el tipo de terreno y de roca madre los desmontes quedaron con una pendiente del 120% y los terraplenes formaron una pendiente del 70% (≈ ángulo de reposo del suelo seco, cuando se realiza la labor).

En la apertura de las terrazas se produce con el tiltdozer una compensación de volúmenes entre el desmonte y el terraplén. El coeficiente de esponjamiento (persistente) se ha cifrado en 1,1 (volumen de terraplén = 1,1· volumen de desmonte).

La densidad de repoblación fijada fue de 1.600 pies/ha plantando dos líneas de pinos (o encinas) en cada terraza (una interior y otra exterior) distanciados 2 m entre sí y al tresbolillo (desfasados para reducir la competencia). No se plantó en la interterraza.

Se pide:

1) Definir la geometría de la terraza.
2) Calcular la distancia horizontal entre los ejes de dos terrazas consecutivas.
3) Hallar la longitud total de terraza a abrir por hectárea.
4) ¿Qué porcentaje de superficie queda inalterado?
5) Evaluar este tipo de preparación del suelo desde el punto de vista hídrico con el modelo MODIPÉ.

R1: Los datos del enunciado sobre la terraza de absorción son los siguientes:

- Anchura de la explanación = a = 3 m
- Ángulo del terreno = λ = 40%
- Ángulo del talud en terraplén = τ = 70%
- Ángulo del talud en desmonte = δ = 120%
- Ángulo de la contrapendiente de la explanación = ε = 5%
- Coeficiente de esponjamiento = 1,1

Algunas de estas magnitudes pueden verse en la figura 24.

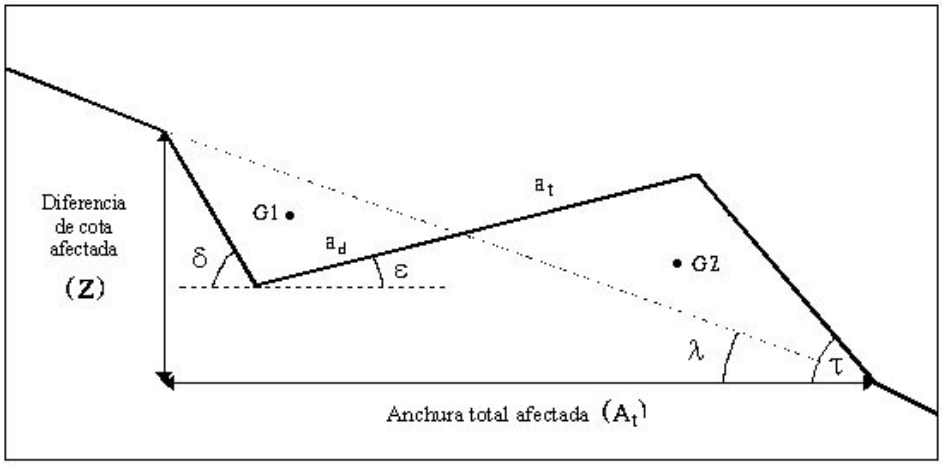


Figura 24: Dibujo esquemático con la sección de una terraza en contrapendiente

Por consideraciones trigonométricas elementales (pero bien farragosas) se puede llegar a que:

- Anchura de explanación en terraplén = a_t =1,360 m
- Anchura de explanación en desmonte = a_d =1,640 m
- Volumen de desmonte por unidad de longitud = 0,9433 m^3/m
- Volumen de terraplén por unidad de longitud = 1,0377 m^3/m
- Longitud de ladera desmontada = 2,757 m
- Longitud de ladera terraplenada = 3,657 m
- Longitud de ladera afectada = 6,414 m
- Diferencia de cota afectada = Z = 2,382 m
- Descenso del c.d.g. de la tierra removida = ΔZ_G = 0,744 m
  Nota: $\Delta Z_G = Z_{G1} - Z_{G2}$ (diferencia de cotas entre G1 y G2; véase la figura 24)
- Anchura total afectada = A_t = 5,955 m
- Sección mojada = A = 0,234 m^2
- Radio hidráulico = R_h = 0,0732 m (= Sección mojada/Perímetro mojado)

Para obtener estos datos de forma rápida y segura basta con correr el programa TERRAZAS que ofrecemos en nuestra página web.

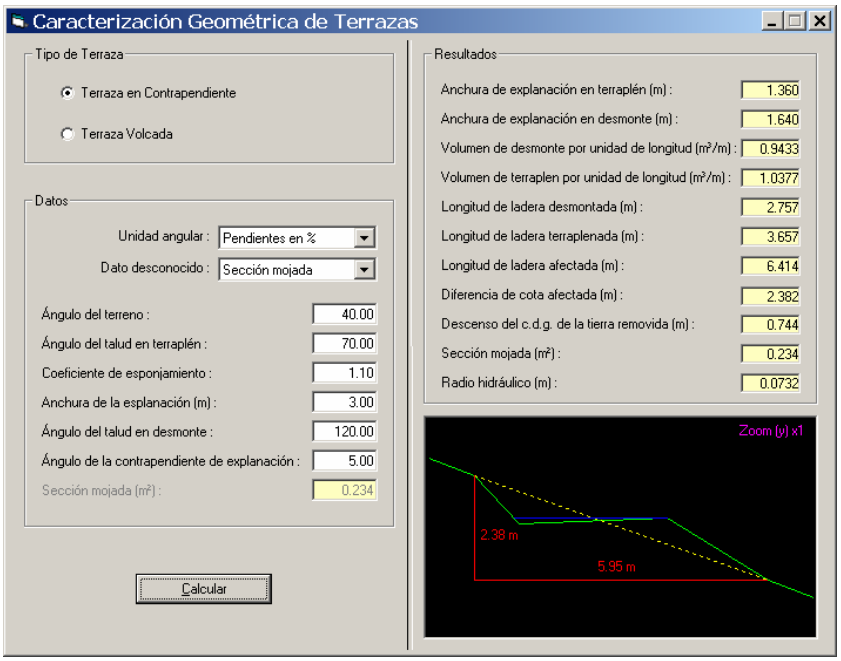


Figura 25: Volcado de pantalla del programa TERRAZAS

R2 y R3: Las ecuaciones que resuelven estos dos apartados son:

$$L = \frac{10.000}{D} \qquad \text{y} \qquad e \cdot D \cdot n_t = 10.000 \cdot n$$

en donde: L = longitud total de terraza a abrir en una hectárea (m)
D = distancia horizontal entre los ejes de dos terrazas consecutivas (m)
e = equidistancia entre plantas contiguas dentro de una línea (m)
n_t = densidad de repoblación (pies/ha)
n = número de líneas de plantación a incluir en cada plataforma

De acuerdo con el enunciado: n_t = 1.600 pies/ha, n = 2 y e = 2 m. Con estos datos tenemos que:

$$D = \frac{n \cdot 10.000}{e \cdot n_t} = \frac{2 \cdot 10.000}{2 \cdot 1.600} = 6{,}25 \text{ m}$$

La longitud total de terraza abierta por hectárea vale:

$$L = \frac{10.000}{D} = \frac{10.000}{6{,}25} = 1.600 \text{ m}$$

R4: El porcentaje de superficie de ladera que no se ve alterado por el aterrazado ($p\%$) es bastante exiguo al ser la distancia entre terrazas contiguas pequeña. Para expresarlo en porcentaje basta con comparar D con la anchura total afectada A_t.

$$p\% = \frac{D - A_t}{D} \cdot 100 = \frac{6{,}25 - 5{,}955}{6{,}25} \cdot 100 = 4{,}72\%$$

R5: Para poder evaluar el aterrazado desde un punto de vista hidrológico lo primero que hay que hacer es identificar los datos geométricos de la unidad sistematizada.

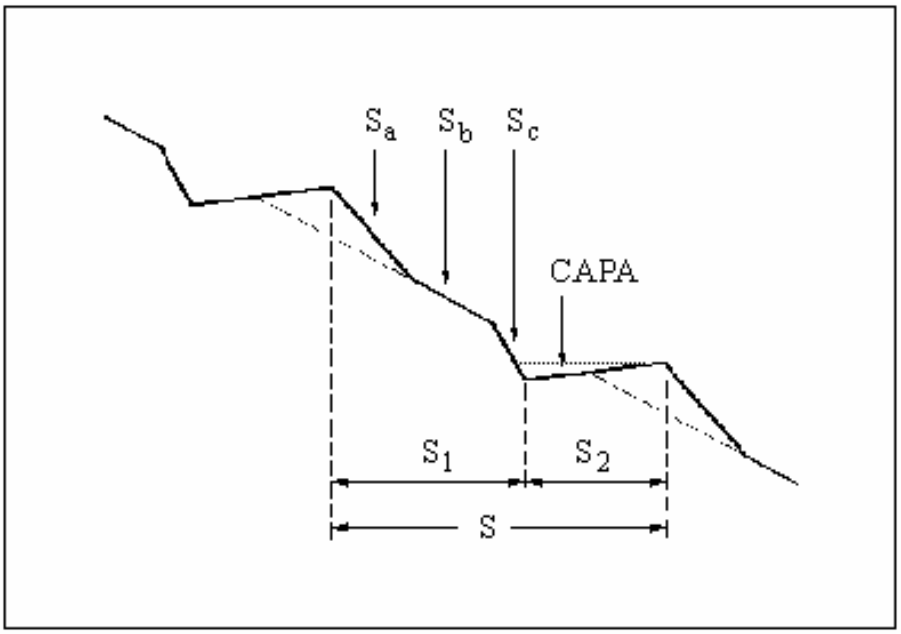


Figura 26: Datos geométricos de la unidad sistematizada

Trabajando por unidad de longitud de terraza (que en este caso coincide con la longitud puesta a disposición de cada planta), tenemos:

$$S = D \cdot 1 = 6{,}25 \ \ m^2$$

$$S_2 = a \cdot \cos\varepsilon = 3 \cdot \cos 2{,}862^{\circ} = 2{,}996 \ \ m^2 \left(\approx 3 \ \ m^2\right)$$

siendo S el tamaño de la unidad sistematizada, S_1 el área de impluvio, S_2 el área de recepción, a el ancho de la explanación y ε el ángulo de la contrapendiente (5%, que se corresponde con 2,862 grados sexagesimales).

$$S_1 = S - S_2 = 3{,}254 \ \ m^2 \left(\approx 3{,}25 \ \ m^2\right)$$

Por otra parte, el área de impluvio consta de tres superficies con características hidrológicas diferentes (razón por la cual conviene individualizarlas) y que son: terraplén (S_a), terreno inalterado (S_b) y desmonte (S_c). Véase la figura 26.

$$S_1 = S_a + S_b + S_c$$

Para calcular estas superficies valen las siguientes relaciones geométricas:

S_a=*(longitud ladera terraplenada)*$\cdot\cos\lambda$-*(anchura explanación en terraplén)*$\cdot\cos\varepsilon$

$$S_b = D - A_t$$

S_c=(longitud ladera desmontada)·cosλ-(anchura explanación en desmonte)·cosε

Trabajando en grados sexagesimales tenemos:

$$tg(\lambda) = 40\% \quad \Leftrightarrow \quad \lambda = 21{,}801^{\circ}$$

$$tg(\tau) = 70\% \quad \Leftrightarrow \quad \tau = 34{,}992^{\circ}$$

$$tg(\delta) = 120\% \quad \Leftrightarrow \quad \delta = 50{,}194^{\circ}$$

$$tg(\varepsilon) = 5\% \quad \Leftrightarrow \quad \varepsilon = 2{,}862^{\circ}$$

Sustituyendo valores y operando, queda:

$$S_a = 3{,}657 \cdot \cos(21{,}801^{\circ}) - 1{,}360 \cdot \cos(2{,}862^{\circ}) = 2{,}037 \ \text{m}^2$$

$$S_b = 6{,}25 - 5{,}955 = 0{,}295 \ \text{m}^2$$

$$S_c = 2{,}757 \cdot \cos(21{,}801^{\circ}) - 1{,}640 \cdot \cos(2{,}862^{\circ}) = 0{,}922 \ \text{m}^2$$

Por otro lado, debemos estimar el tamaño de la trampa creada con la explanación en contrapendiente (por unidad de longitud lineal):

CAPA = Sección mojada máxima·1 = 0,234 m^3 = 234 litros (por metro lineal)

El volumen de alcorque por metro cuadrado de unidad sistematizada resulta en este caso bastante elevado: $CAPA/S = 234/6{,}25 = 37{,}44 \ l/m^2$, lo que apunta hacia unos movimientos de tierra exagerados para los fines perseguidos con la preparación del suelo. Conviene recordar que este cociente coincide con la precipitación límite (*P2*) en terrenos totalmente impermeables y que sirve de estimador para evaluar el impacto paisajístico de la preparación del suelo.

En cuanto a los datos hidrológicos, hemos de fijar los números de curva de la ladera actual (*NAC*), del área de impluvio (*NI*) y del área de recepción (*NR*), para –posteriormente y con el programa MODIPÉ– obtener otros datos relevantes (como el número de curva equivalente (*NEQ*) y la precipitación límite (*P2*)).

La ladera inicial (es decir: antes de la intervención) se puede asimilar a un pastizal regular (con entre un 50% y un 75% de cobertura entre especies herbáceas y leñosas) sobre un litosuelo (tipo D), lo que corresponde a un número de curva (*NAC*) de 84, en condiciones medias de humedad (Véase el apéndice 1).

En el área de impluvio pueden diferenciarse tres zonas, una de desmonte, otra de terreno inalterado y otra de terraplén. La zona de desmonte puede considerarse como un barbecho desnudo y suelo de tipo D, con un número de curva de 94. Al terreno inalterado, obviamente, le corresponderá un número de curva igual a *NAC*, es decir, 84. Y, finalmente, en el terraplén nos encontramos con un barbecho bueno (con bastantes

residuos vegetales y el terreno esponjado) que tiene un número de curva de 88. Para calcular el número de curva del área de impluvio (*NI*) es necesario realizar la media de los valores antes establecidos, ponderándolos por la superficie que corresponde a cada zona:

$$NI = \frac{2{,}037 \cdot 88 + 0{,}295 \cdot 84 + 0{,}922 \cdot 94}{3{,}254} = 89{,}337 \approx 89$$

Esta ponderación la realiza el programa MODIPÉ al elegir la opción "Área de impluvio formada por más de un complejo hidrológico".

Por último, el área de recepción puede considerarse como un camino en tierra (por la creación de la plataforma) sobre suelo de tipo C (debido al subsolado profundo y a la acumulación de tierra removida en el terraplén). Estas características implican un número de curva (*NR*) de 87, con lo que ya estamos en disposición de trabajar con el programa MODIPÉ, pues conocemos todos los datos de entrada del modelo.

Área de impluvio, S_1 = 3,25 m^2

Área de recepción, S_2 = 3 m^2

Tamaño de la trampa de agua, *CAPA* = 234 litros

Número de curva de la ladera actual, *NAC* = 84

Número de curva del área de impluvio, *NI* = 89

Número de curva del área de recepción, *NR* = 87

El programa MODIPÉ (versión 2.0) ofrece en su primera pantalla de resultados (figura 28) un análisis comparado de los números de curva introducidos con una interpretación de tales relaciones. Así mismo y como resultado principal, muestra los números de curva (para las tres condiciones de humedad: seco, intermedio y húmedo) con sus correspondientes umbrales de escorrentía (para la ladera actual, el área de impluvio, el área de recepción y la unidad sistematizada). Mediante volcados de pantalla se obtienen las dos figuras siguientes.

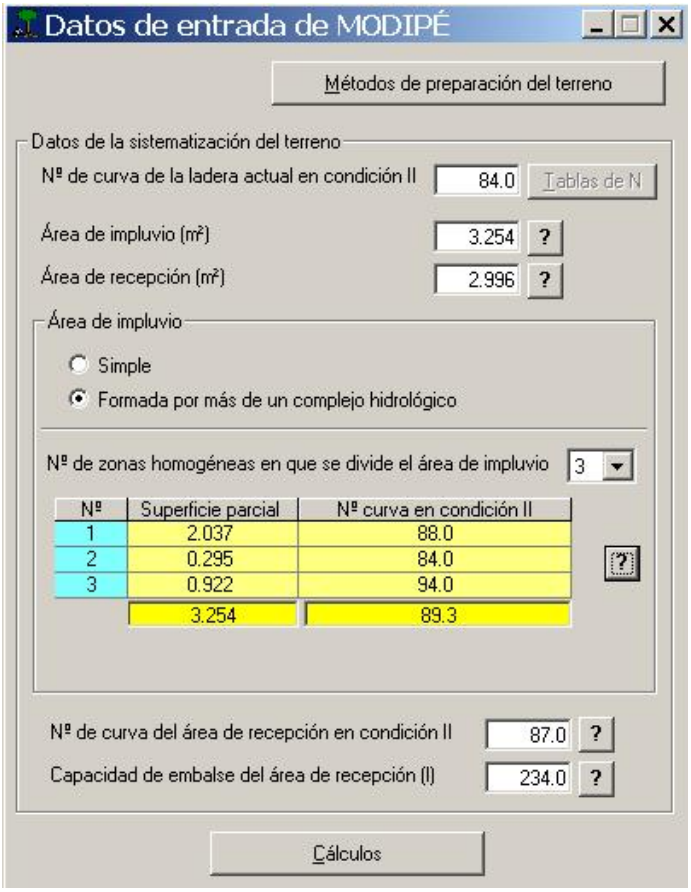


Figura 27: Volcado de pantalla de MODIPÉ 2.0 con los datos de entrada

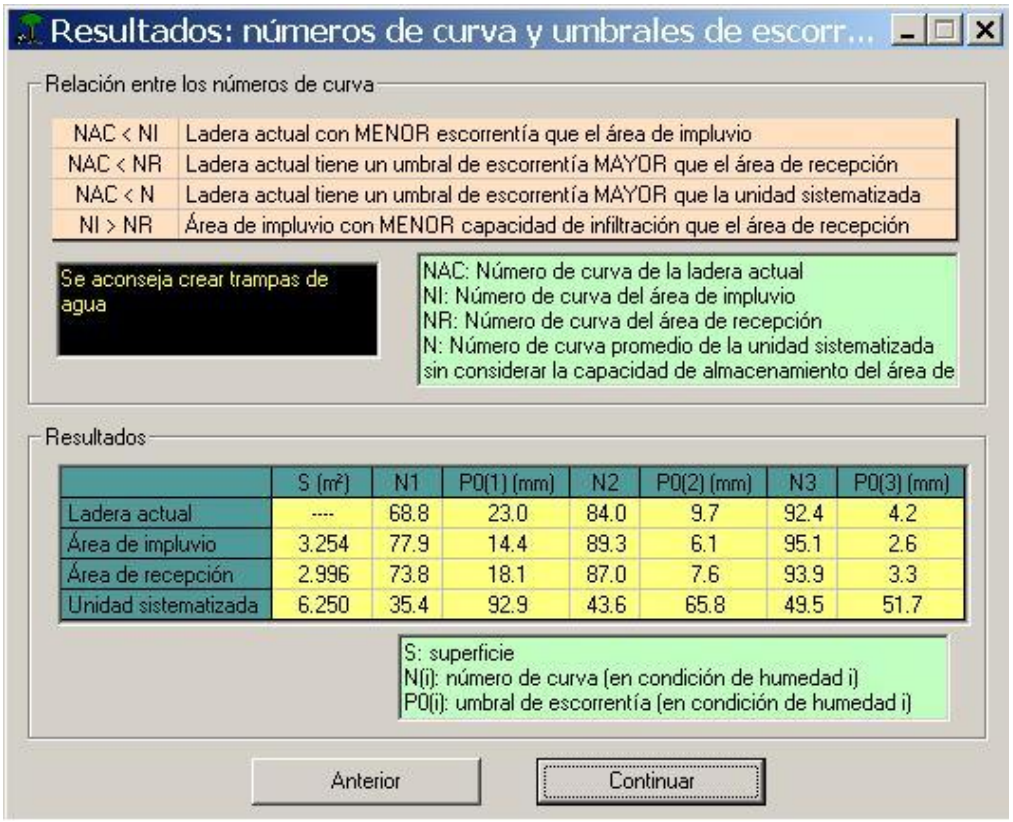


Figura 28: Volcado de pantalla con los resultados principales del modelo MODIPÉ

De acuerdo con los resultados obtenidos, se aprecia que estamos ante un ecosistema inicial degradado, con una baja capacidad de acogida de agua debido a sus elevados números de curva. Sus umbrales de escorrentía así lo atestiguan: con que lluevan 9,7 mm en unas condiciones medias de humedad en la ladera se produce escorrentía. Si llueve sobre mojado (condición $J = 3$ de humedad), el umbral se reduce a 4,2 mm. Sobre suelo bien seco (condición $J = 1$) la escorrentía superficial comienza con aguaceros superiores a 23 mm. Esta circunstancia propicia una sequedad en la ladera que no concuerda con la pluviometría del lugar. La situación será más patente si, como es característico en el clima mediterráneo, se producen bastantes episodios de lluvia a lo largo del año que generan escorrentía. La erosión consiguiente y la pérdida de recursos hídricos pueden desembocar en un proceso irreversible de desertificación.

Con la sistematización del terreno el comportamiento hidrológico de la ladera cambia sustancialmente. Los umbrales de escorrentía se elevan gracias a una fuerte disminución del número de curva equivalente respecto del número de curva de la ladera original ($NAC > > NEQ$). Para la unidad sistematizada los umbrales de escorrentía ($P2$) pasan a valer 92,9 mm en suelo seco, 65,8 mm en condiciones medias y 51,7 mm en suelo húmedo. Como consecuencia inmediata tendremos que el ecosistema va a poder aprovechar mejor el agua. Las posibilidades de incrementar la cobertura vegetal son ahora, por lo tanto, 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 mayores disponibilidades hídricas que las indicadas por los pluviómetros.

Para verificar este hecho basta con analizar el comportamiento de la ladera actual y de la unidad sistematizada ante un aguacero estándar. Como tal, sugerimos emplear una lluvia de 40 l/m^2 bajo condiciones medias de humedad (que se corresponde con un aguacero intenso en cualquier lugar, aunque posea diferente periodo de retorno según la zona). Para la comarca del Cerrato (Palencia, España) se corresponde con un periodo de retorno de 30 años.

Los resultados de disponibilidad hídrica gracias al aguacero estándar se ofrecen en la figura 29. En la ladera degradada actual (con su número de curva, $NAC = 84$ y su umbral de escorrentía, $PAC = 9{,}7$ mm) se aprovechan 28,3 l/m^2 de los 40 mm llovidos (un 71%). En la ladera sistematizada se aprovecha toda la lluvia ($PROM = 40$ mm) con la ventaja estratégica adicional de que, al tratarse de una precipitación idónea, el área de recepción se nutre de cosechas de agua provenientes del área de impluvio, lo que explica que la disponibilidad hídrica del área colectora sean 59,5 mm (bastante mayor que la precipitación del aguacero).

Un dato importante que interesa analizar se refiere al tamaño mínimo que debe tener la trampa de agua para conseguir endorreísmo. En el ejemplo que manejamos (figura 29) la capacidad mínima de embalse para recoger toda la escorrentía es de 102,7 litros (frente a $CAPA = 234$ l). Puesto que el aguacero estándar tiene un periodo de retorno considerable (30 años en el Cerrato Palentino) podemos concluir que las trampas de agua del aterrazado tienen un tamaño exagerado con relación a las necesidades de endorreísmo (lo que ya vislumbrábamos al hallar el cociente $CAPA/S$).

A modo de resumen, podemos decir que no es el efecto hídrico el que debe cuestionarse en este aterrazado, pues se anula la escorrentía y se consiguen cosechas de

agua muy útiles para el repoblado. Los problemas se centran en que la preparación del suelo afecta a la mayor parte de la superficie de la ladera y en que se remueve un volumen desmedido de tierra creando una topografía artificial en graderío que perdura en el tiempo. Interesan terrazas de absorción más estrechas, más pequeñas, con trampas de agua proporcionadas a las necesidades de endorreísmo de la ladera.

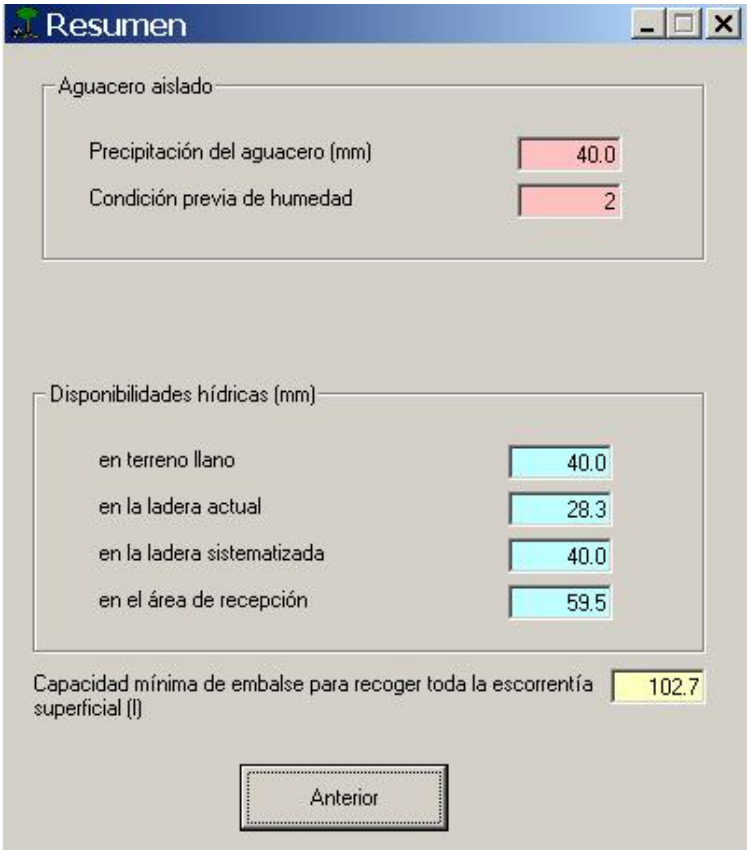


Figura 29: Disponibilidades hídricas en las diferentes zonas a consecuencia de un aguacero estándar de 40 l/m^2

Ejemplo 5

Las zanjas de infiltración (también: zanjas de ladera o de absorción, zanjas trinchera, o tinas ciegas) son trampas de agua excavadas con forma alargada, que siguen curvas de nivel (figura 30) (Rázuri, 1984; Lemus y Navarro, 2003; Anónimo, 2005; Pizarro *et al.*, 2008). Se construyen en terrenos con suelos suficientemente profundos o cuya roca madre sea fácil de horadar manualmente, con el fin de retener toda la escorrentía superficial e infiltrarla.

Figura 30: Panorámica de una ladera con zanjas de infiltración (autor: J. Navarro Hevia)

Esta preparación del suelo tiene dos objetivos fundamentales: la estabilización del suelo y el almacenamiento temporal de escorrentías superficiales (para su posterior infiltración).

Las zanjas de ladera reducen la erosión hídrica al dividir la longitud total de la cuesta en porciones menores. Simultáneamente, actúan como trampas de agua, de suelo y de nutrientes.

Esta intervención está muy extendida en zonas áridas y semiáridas de Hispanoamérica (Chile, Perú, Bolivia, Venezuela, México) mientras que es desconocida en España, pues la presencia generalizada de suelos esqueléticos sobre rocas madres duras impide aquí la construcción de zanjas de infiltración. En terrenos someros y muy pedregosos, en vez de zanjas pueden construirse pequeños caballones de piedra según curvas de nivel (diques de reconstitución, con $H \approx 0{,}25$ a $0{,}5$ m), tal y como se hiciera en la sierra de Espuña (Murcia, España) a finales del siglo XIX en unas extensas y exitosas repoblaciones forestales con distintas especies arbóreas (Codorníu, 1900; Montiel, 1955). Los cordones (o caballones) de piedras del lugar hacen las veces de zanjas y retienen el agua y el suelo con eficacia mientras se va instalando el repoblado.

El diseño de un sistema de zanjas de infiltración se basa en dos criterios, conforme a los dos objetivos que persiguen: control de la erosión y control de la

escorrentía. Considerando ambas exigencias, se puede comprobar que es la segunda la más restrictiva, de manera que se afronta su diseño imponiendo la condición de endorreísmo. Fijando el tamaño de las zanjas y su espaciamiento conforme a este criterio, se logran unas pérdidas de suelo suficientemente bajas, es decir: tolerables.

En cualquier caso, conviene analizar y combinar ambos criterios, pues se trata de estructuras para la conservación de aguas y suelos.

El objetivo de conservación de suelos puede modelarse con la ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE). Al fijar un valor máximo tolerable de pérdidas de suelo (A_t) en dicha ecuación y despejando el factor topográfico de la ladera, nos queda:

$$L{\cdot}S = \frac{A_t}{R{\cdot}K{\cdot}C{\cdot}P}$$

siendo: $L{\cdot}S$ = Factor topográfico de la ladera (adimensional)
L = Factor longitud de la ladera (adimensional)
S = Factor pendiente de la ladera (adimensional)
A_t = Pérdidas de suelo tolerables al año ($t{\cdot}ha^{-1}{\cdot}año^{-1}$)
R = Índice de erosión pluvial del lugar ($hJ{\cdot}cm{\cdot}m^{-2}{\cdot}h^{-1}$)
K = Factor de erosionabilidad del suelo ($t{\cdot}m^2{\cdot}h{\cdot}ha^{-1}{\cdot}hJ^{-1}{\cdot}cm^{-1}$)
C = Factor cubierta vegetal o cultivo (adimensional)
P = Factor de prácticas de conservación de suelos (adimensional)

De esta manera, a través del factor topográfico ($L{\cdot}S$), se puede fijar el espaciamiento (o distanciamiento) entre zanjas de infiltración consecutivas. Conviene señalar, que el proceso de cálculo requiere de tanteos, pues por el mero hecho de construir la zanja, el perfil de la ladera se ve alterado y pasa a ser complejo (con -al menos- tres pendientes diferentes), lo que afecta al valor del factor topográfico ($L{\cdot}S$).

Sin embargo, el criterio más exigente y que –por lo tanto– define el diseño de las zanjas de infiltración se refiere a la consecución de endorreísmo. Aplicando la ecuación de continuidad: $E_s{\cdot}D = CAPA$

(volumen de escorrentía producido por el aguacero = tamaño de la trampa de agua)

es como se fija la sección transversal de la zanja ($CAPA$) y el distanciamiento horizontal (D) entre zanjas consecutivas.

Resulta muy ilustrativo comprobar cómo en esta ocasión (como en tantas otras) la condición más exigente se refiere al agua y no al suelo. Quien acostumbre a leer tratados sobre Conservación de Suelos puede quedar sorprendido, pero bastará con que dé respuesta a la siguiente pregunta para acallar sus dudas: ¿Qué es primero: la erosión hídrica o la escorrentía superficial?

El espaciamiento (D) entre zanjas de infiltración, atendiendo solamente al control de la erosión, suele dar valores muy altos que exigen secciones desmedidas para la zanja, si se desea retener toda la escorrentía superficial. Por el contrario, la imposición de endorreísmo conduce a distanciamientos menores para zanjas de sección habitual (orden de magnitud: $A \approx 1\ m^2$).

La remoción del suelo y el pequeño movimiento de tierras que se realiza con la apertura de la zanja crean una erosión inicial. El simple traslado del centro de gravedad de las tierras de la zanja a cotas inferiores (de G1 a G2) debe considerarse como un proceso erosivo (erosión por preparación del terreno; véase la figura 31) (Martínez de Azagra *et al*., 2002). Al mismo tiempo, las zonas terraplenadas quedan desnudas y con un suelo sin consolidar durante los primeros años. Por ello, una medida muy

recomendable consiste en revegetar los caballones nada más abrir la zanja (trasplantando la misma vegetación existente en la zona de la zanja, plantando tepes de yerbas adecuadas, sembrando, etc.).

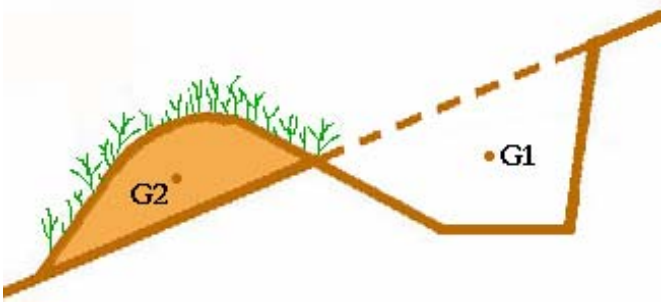


Figura 31: Erosión por preparación del terreno (G1 pasa a G2)

Una buena práctica adicional consiste en hacer unos pequeños rebajes en las separaciones entre zanjas contiguas al mismo nivel, para que el agua se pueda redistribuir y rellene zanjas aún no colmadas. De esta manera, se perfila una sistematización secundaria incipiente, que puede llegar a funcionar como un auténtico canal de desviación. Si ésa fuese la finalidad última de los rebajes se recomienda dimensionarlos con criterios hidráulicos.

En el apéndice 5 figuran los valores de referencia para el diseño de zanjas de infiltración. Vamos a dar una orientación sobre las dimensiones estándar de este tipo de preparación del suelo, antes de abordar un ejercicio práctico: Tanto la profundidad (*H*) como la anchura de las zanjas (*b*) no suele superar el metro; su longitud según curvas de nivel (*L*) es de 2 a 10 metros; el distanciamiento horizontal entre zanjas consecutivas (*D*) se suele situar en el intervalo 7,5 – 50 metros (dependiendo del terreno y la precipitación de cálculo); las zanjas contiguas dentro de una misma curva de nivel deben quedar separadas por un tabique de tierra de al menos 0,4 m (aunque suelen disponerse con separaciones mayores, similares a la propia longitud de la zanja, si se adopta una distribución al tresbolillo; véase la figura 32). En cuanto a la precipitación de diseño (P_c), se trabaja con periodos de retorno pequeños (entre 5 y 25 años). Como valor estándar se puede trabajar con una lluvia de 50 mm (Rázuri, 1984).

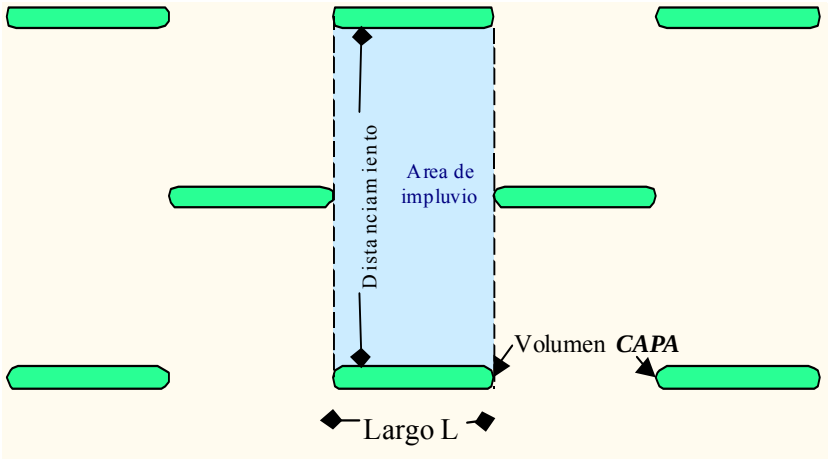


Figura 32: Esquema de zanjas al tresbolillo (Lemus & Navarro, 2003)

Las zanjas de infiltración (como cualquier sistema de recolección de agua) son muy sensibles a cambios en el tamaño de la trampa de agua. Baste con recordar que la precipitación límite resulta proporcional a dicho tamaño en terrenos impermeables (véase la cuestión 10: $P2 \geq CAPA/S$). Por eso conviene que analicemos la geometría de las zanjas de infiltración con detalle, antes de proceder a resolver un caso práctico concreto.

Las ecuaciones que resuelven la geometría de una sección transversal genérica (figura 33) son las siguientes:

$$a_s = b + H_d \cdot (z_{inf} + z_{sup})$$

$$z_{inf} = cotg\ \theta_1 \quad \text{y} \quad z_{sup} = cotg\ \theta_2$$

$$A = (b + a_s) \cdot \frac{H_d}{2} = b \cdot H_d + \frac{1}{2} \cdot H_d^{\,2} \cdot (z_{inf} + z_{sup})$$

$$L_d = \frac{a_s \cdot \operatorname{sen} \theta_2}{\operatorname{sen}(\theta_2 - \lambda)}$$

$$V_d = A + 0{,}5 \cdot L_d \cdot a_s \cdot \operatorname{sen}(\lambda)$$

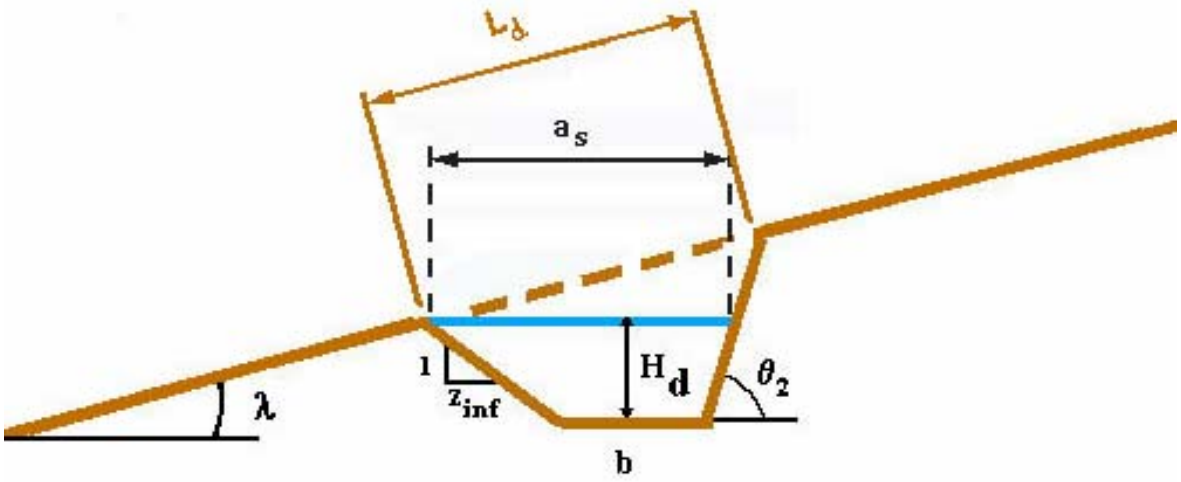


Figura 33: Sección transversal de una zanja de infiltración

Siendo: b = ancho de la base de la zanja, H_d = profundidad de la zanja; z_{inf} = talud inferior; z_{sup} = talud superior; a_s = ancho superficial; A = sección transversal; λ = ángulo que forma el terreno con la horizontal; θ_1 = ángulo que forma el talud inferior de la zanja con la horizontal; θ_2 = ángulo que forma el talud superior de la zanja con la horizontal; L_d = longitud de ladera desmontada; V_d = volumen de ladera desmontado por unidad de longitud (o volumen de corte); S_1 = área de impluvio; S_2 = área de recepción; $S = S_1 + S_2$ = superficie de la unidad sistematizada; D = distanciamiento entre dos

zanjas de infiltración consecutivas; L = largo de la zanja de infiltración (véanse las figuras 32 y 33).

El tamaño del área de recepción valdrá: $S_2 = a_s \cdot L$

A su vez, la unidad sistematizada tiene una superficie de: $S = S_1 + S_2 = D \cdot L$

y el área de impluvio: $S_1 = (D - a_s) \cdot L$

El tamaño de la trampa de agua vale: $CAPA = A \cdot L$

Puede trabajarse por unidad de longitud de zanja, de manera que L = 1 m.

Como secciones particulares contempladas por estas ecuaciones, cabe mencionar las dos siguientes: las secciones rectangulares (en las que $z_{inf} = z_{sup} = 0$) y las secciones triangulares (en las que b= 0 m).

Al abrir la zanja de infiltración cabe esparcir la tierra por la ladera sin crear un caballón que incremente la capacidad de la zanja. Sin embargo, lo más frecuente, práctico y barato consiste en formar un camellón con dicha tierra. Se aumenta con ello el volumen de agua de escorrentía que puede retener la zanja. Por el contrario, el impacto paisajístico negativo de la intervención puede ser mayor.

Para evaluar el incremento de capacidad de la zanja y para orientar en el diseño del caballón, vamos a admitir que éste tiene una forma trapezoidal, como se ve en la figura 34.

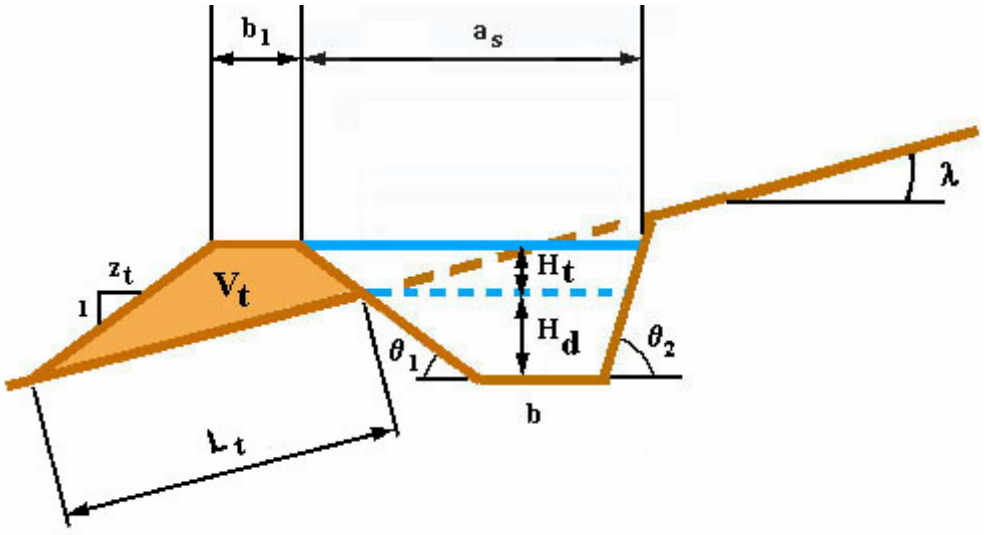


Figura 34: Zanja de infiltración con camellón trapezoidal

Si se opta por una solución en la que no se incremente la profundidad de la zanja, valdrá: $H_t = 0$ m; $H = H_d$ (como en las figuras 33 y 35 a), resultando el ancho de la berma (b_1) máximo.

Como solución contrapuesta (y teórica, por ser inestable) tenemos aquélla en la que el ancho de la berma sea nulo (b_1 = *0* m), resultando un incremento en la profundidad de la zanja (H_t) máximo (figura 35 b).

En general, se recomienda que: $H_t \leq H_d$.

El volumen de desmonte (V_d) y el volumen de caballón (o de terraplén, V_t) están íntimamente relacionados, pues ha de existir compensación entre volúmenes. En un principio, cabe plantear que: $V_t \geq V_d$ (por el fenómeno de la tumefacción). Pero a nivel práctico, no conviene considerar el esponjamiento inicial de la tierra excavada, ya que ésta debe apelmazarse (compactarse) hasta una situación similar a la original para que la retención de agua en la zanja sea segura. Así pues: $V_t \approx V_d$

Al imponer esta igualdad entre volúmenes se obtiene una ligazón entre el ancho de la berma (b_1) y el aumento de profundidad conseguido (H_t). Las ecuaciones que resuelven son:

$$H = H_d + H_t$$

$$V_d = A + 0{,}5 \cdot L_d \cdot a_s \cdot \text{sen}(\lambda) = V_t$$

$$V_t = A_t + 0{,}5 \cdot L_t \cdot a_t \cdot \text{sen}(\lambda) = V_d$$

siendo:

$$z_t = cotg\ \theta_3$$

$$A_t = \left(b_1 + a_t\right)\frac{H_t}{2}$$

$$a_t = b_1 + H_t \cdot \left(z_{\text{inf}} + z_t\right)$$

$$L_t = \frac{a_t \cdot \text{sen}(\theta_3)}{\text{sen}\left(\theta_3 - \lambda\right)}$$

Figura 35: Casos extremos considerados

Al igualar volúmenes:

$$V_t = V_d \Leftrightarrow \left(2 \cdot b_1 + H_t \cdot \left(z_{\text{inf}} + z_t\right)\right)\frac{H_t}{2} + 0{,}5 \cdot \frac{a_t \cdot \text{sen}(\theta_3)}{\text{sen}\left(\theta_3 - \lambda\right)} \cdot \left(b_1 + H_t \cdot \left(z_{\text{inf}} + z_t\right)\right)\text{sen}(\lambda) = V_d$$

en donde el ancho de la mota (b_1) o el incremento de profundidad de la zanja (H_t) son los valores a determinar (siempre uno a partir del otro). Ambas magnitudes quedan de forma implícita en la expresión, de manera que han de obtenerse por aproximaciones sucesivas.

Los casos extremos planteados sí admiten una solución explícita. En concreto:

- si $H_t = 0$ m, entonces: $b_1 = \sqrt[2]{\frac{2 \cdot V_d \cdot \text{sen}(\theta_3 - \lambda)}{\text{sen}(\theta_3) \cdot \text{sen}(\lambda)}}$

- Si $b_1 = 0$ m, entonces: $H_t = \sqrt[2]{\frac{2 \cdot V_d}{(z_{\text{inf}} + z_t) \cdot \left(1 + \frac{\text{sen}(\theta_3) \cdot \text{sen}(\lambda)}{\text{sen}(\theta_3 - \lambda)} \cdot (z_{\text{inf}} + z_t)\right)}}$

Conviene advertir que al fijar H_t hay que comprobar que esta altura no sea superior al producto ($L_d \cdot sen(\lambda)$), ya que –de lo contrario– la sección mojada máxima de la zanja incluiría un tramo de ladera inalterada (no siendo válidas muchas de las ecuaciones anteriores). Véase la figura 35 b.

La longitud de ladera alterada por la construcción de la zanja (L_{tot}) se obtiene como suma de las longitudes desmontada (L_d) y terraplenada (L_t):

$$L_{tot} = L_d + L_t$$

Su proyección horizontal nos da el ancho total de la zanja (B_{tot}):

$$B_{tot} = L_{tot} \cdot cos(\lambda)$$

Por último, el porcentaje de ladera afectado por la construcción de las zanjas de infiltración (af) se obtiene mediante el cociente B_{tot}/D

$$af = \frac{B_{tot}}{D} \cdot 100$$

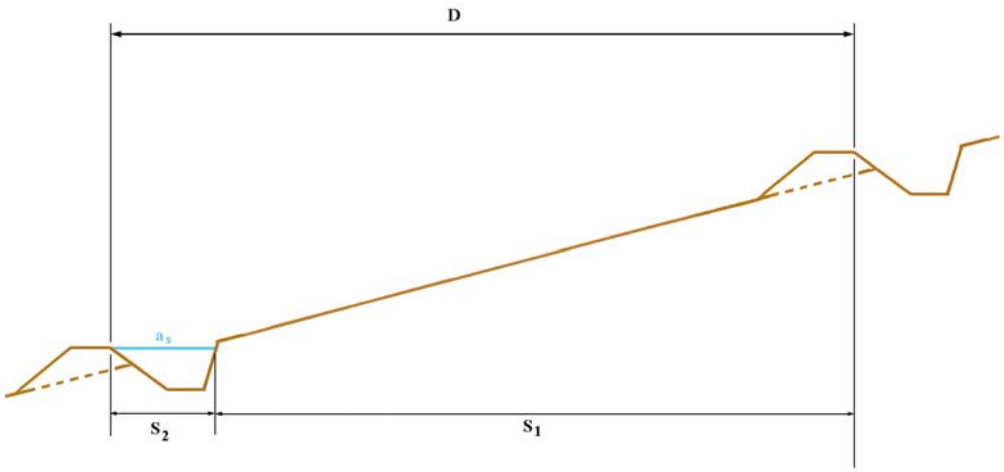


Figura 36: Dos zanjas de infiltración con sus datos geométricos principales

Una vez plasmada la geometría de las zanjas de infiltración, vamos a pasar a estudiar un caso práctico. Considere una zanja de infiltración de tamaño estándar con las siguientes medidas: Ancho de la base b = 0,30 m; profundidad de la zanja excavada H_d = 0,35 m; talud superior z_{sup} = 1 y talud inferior z_{inf} = 1,25. La ladera en la que se abren las zanjas tiene una pendiente del 60%. Su número de curva vale *NAC* = 86, correspondiente a un pastizal pobre sobre suelo de tipo C.

Compare dos formas de trabajar diferentes: En la primera (caso 1) se esparce la tierra excavada sin incrementar la capacidad de la zanja, en la segunda (caso 2) se perfila un caballón que aumenta la profundidad de la zanja en 15 cm (es decir: H_t = 0,15 m) valiendo z_t = 1,25.

1) Calcule el tamaño de la zanja de infiltración (por unidad de longitud) en las dos situaciones descritas así como el tamaño del área de recepción.
2) Para un aguacero de 50 mm (con condiciones medias de humedad) obtenga el distanciamiento máximo entre dos zanjas de infiltración consecutivas, de manera que haya endorreísmo. Los números de curva a considerar son: *NAC* = 86; número de curva del área de impluvio *NI* = 86 [caso 1]; *NI* = 88 [caso 2; ligero aumento respecto de *NAC* por el perfilado del caballón]; y número de curva del área de recepción *NR* = 94 [barbecho desnudo en suelo de tipo D].
3) ¿Qué coeficiente de escorrentía presenta el área de impluvio para el aguacero de cálculo? Con el coeficiente de escorrentía anterior, halle el distanciamiento aproximado entre zanjas de infiltración consecutivas.
4) ¿Qué porcentaje de ladera se ve afectado por la construcción de las zanjas de infiltración en ambos casos?
5) Si las zanjas de infiltración sirven de apoyo a una línea de árboles jóvenes que prospectan con sus raíces el 100% del área de recepción así como otra superficie igual de área de impluvio, ¿qué disponibilidad hídrica les procurará a los brinzales un aguacero de 30 mm (para una condición de humedad antecedente *J* = 2)?

R1: Caso 1

$$a_s = b + H_d \cdot (z_{\inf} + z_{\sup}) = 0{,}3 + 0{,}35 \cdot (1{,}25 + 1) = 1{,}0875 \text{ m} = S_2$$

El ancho superficial de la zanja (a_s) coincide con el tamaño del área de recepción (si trabajamos por unidad de longitud; L = 1 m): S_2 = 1,0845 m^2/m

$$A = (b + a_s) \cdot \frac{H_d}{2} = (0{,}3 + 1{,}0875) \cdot \frac{0{,}35}{2} = 0{,}2428125 \text{ m}^2$$

El tamaño de la trampa de agua por metro lineal de zanja coincide con la sección transversal (A). En litros valdrá: $CAPA = 242{,}8$ litros por metro lineal

$$z_{\sup} = \cot g(\theta_2) = 1 \Rightarrow \theta_2 = \pi/4$$

La pendiente de la ladera (del 60%) en radianes equivale a λ = 0,5404195

$$L_d = \frac{a_s \cdot sen\theta_2}{sen(\theta_2 - \lambda)} = \frac{1{,}0875 \cdot sen(\pi/4)}{sen(0{,}25 \cdot \pi - 0{,}5404195)} = 3{,}1705801 \text{ m}$$

$$V_d = A + 0{,}5 \cdot L_d \cdot a_s \cdot sen(\lambda) = 0{,}2428125 + 0{,}5 \cdot 3{,}1705801 \cdot 1{,}0875 \cdot sen(0{,}5404195)$$

V_d = 1,1298047 m^2

El volumen de ladera desmontado (por metro lineal de zanja) es de 1,1298 m^3/m.

Caso 2

$H = H_d + H_t = 0{,}35 + 0{,}15 = 0{,}5$ m

Primeramente, hay que comprobar si $H_t \leq L_d \cdot sen(\lambda)$.

$L_d \cdot sen(\lambda) = 3{,}1705801 \cdot sen(0{,}5404195) = 1{,}63125 > H_t = 0{,}15$ m

Una vez hecha esta comprobación:

$a_s = b + H \cdot (z_{inf} + z_{sup}) = 0{,}3 + 0{,}5 \cdot (1{,}25 + 1) = 1{,}425$ m = S_2

El ancho superficial (a_s) coincide con el tamaño del área de recepción (por unidad de longitud).

$$A = (b + a_s) \cdot \frac{H}{2} = (0{,}3 + 1{,}425) \cdot \frac{0{,}5}{2} = 0{,}43125 \text{ m}^2$$

El tamaño de la trampa de agua por metro lineal de zanja vale:

$CAPA = 431{,}2$ litros por metro lineal

CAPA resulta muy superior al primer caso, lo que es muy ventajoso para lograr endorreísmo, sin resultar peligroso (pues el ancho estimado para la mota es superior a medio metro: $b_1 \approx 0{,}547$ m, valor que se obtiene por aproximaciones sucesivas al igualar volúmenes: $V_d = V_t$).

R2: Con los datos del enunciado y los obtenidos en el apartado 1 se puede hacer uso del programa informático MODIPÉ. Se trata de encontrar un tamaño de área de impluvio (S_1) que origine una precipitación límite (en condiciones medias de humedad) de 50 mm. Todos los datos del programa son conocidos a excepción de S_1, que ha de obtenerse por tanteos.

Caso 1
NAC = 86
S_1 = incógnita con la que lograr que *P2(2)* = 50 mm
S_2 = 1,0875 m^2
NI = 86
NR = 94
CAPA = 242,8 litros

Al operar con el programa MODIPÉ se llega a que S_1 = 9,79 m^2, por lo que el distanciamiento máximo entre dos zanjas de infiltración consecutivas (para que haya endorreísmo con una precipitación de 50 l/m^2, en condiciones medias de humedad, *J* = 2) valdrá:

$D = S_1 + S_2 = 9{,}79 + 1{,}0875 = 10{,}8775$ m; es decir: 10,8 metros

Caso 2
NAC = 86
S_1 = incógnita con la que lograr que *P2(2)* = 50 mm
S_2 = 1,425 m^2
NI = 88
NR = 94
CAPA = 431,2 litros

Al operar con el programa MODIPÉ se llega a que S_1 = 16,00 m^2.

El distanciamiento máximo entre dos zanjas de infiltración consecutivas (las mismas que en el caso 1, sólo que aprovechando la tierra excavada para hacer un caballón) vale en este caso:

$$D = S_1 + S_2 = 16{,}00 + 1{,}425 = 17{,}425 \text{ m; es decir: 17,4 metros}$$

Con los datos del caso práctico estudiado se comprueba la importancia que tienen los caballones para aumentar la eficacia de la preparación proyectada sin la necesidad de tener que abrir zanjas de infiltración más grandes.

En cualquier sistema de recolección de agua, la variable *CAPA* debe ser tratada y estimada con precisión pues tiene una gran incidencia en el comportamiento hidrológico de la preparación del suelo. De hecho, *CAPA* resulta proporcional a la precipitación límite (en el supuesto de suelos impermeables): $P2 \geq CAPA/S$.

R3: El coeficiente de escorrentía (*C*) se obtiene como cociente entre la escorrentía y la precipitación: $C = \frac{E_s}{P}$. En el caso que nos ocupa, la escorrentía en el área de impluvio (E_{s1}) la podemos estimar por el método del número de curva:

$$E_{s1} = \frac{(P - P_0)^2}{P + 4 \cdot P_0}$$

$$P_0 = 0{,}2 \cdot \frac{25.400 - 254 \cdot NI}{NI} = \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot NI}{NI}$$

Sustituyendo valores y operando se obtiene la tabla siguiente:

Caso 1	Caso 2
$NI = 86$	$NI = 88$
$P_0 = 8{,}269$ mm	$P_0 = 6{,}927$ mm
$P = 50$ mm	$P = 50$ mm
$E_{s1} = 20{,}961$ mm	$E_{s1} = 23{,}874$ mm
$C = 0{,}4192$	$C = 0{,}4774$

La condición de endorreísmo simplificada se escribe: $E_{s1} \cdot D = CAPA$ (que iguala el volumen de escorrentía producido por el aguacero con el tamaño de la trampa de agua). Luego $D = CAPA/E_{s1}$.

Para el caso 1 tenemos: $D = CAPA/E_{s1} = \frac{242{,}8}{20{,}961} = 11{,}583$ (11,5 metros)

Para el caso 2: $D = CAPA/E_{s1} = \frac{431{,}2}{23{,}874} = 18{,}061$ (18,0 metros)

Los valores de *D* que salen por este procedimiento resultan algo mayores que los del apartado precedente, pues aquí no se tiene en cuenta que el área de recepción es menos permeable que el área de impluvio ($NR > NI$). Hemos considerado un único coeficiente de escorrentía (*C*), cuando en rigor habría que trabajar con dos coeficientes

de escorrentía: el del área de impluvio (que hemos calculado) y el del área de recepción (*CI* y *CR*; véase el trabajo de Martínez de Azagra (2006)).

R4: Hemos de estimar la longitud de ladera alterada por la construcción de la zanja, sobre el terreno (L_{tot}) y en proyección horizontal (B_{tot}), para después hallar el dato que nos piden (*af*).

$$L_{tot} = L_d + L_t$$

$$L_d = \frac{a_s \cdot \operatorname{sen}\theta_2}{\operatorname{sen}(\theta_2 - \lambda)}$$

$$L_t = \frac{a_t \cdot \operatorname{sen}(\theta_3)}{\operatorname{sen}(\theta_3 - \lambda)} \qquad \text{con} \qquad a_t = b_1 + H_t \cdot (z_{\inf} + z_t)$$

$\theta_3 = 0{,}6747409$ (pues $z_t = 1{,}25$)

$b_1 \approx 0{,}547$ m

$$B_{tot} = L_{tot} \cdot \cos(\lambda)$$

$$af = \frac{B_{tot}}{D} \cdot 100$$

Operando se llega a los resultados que figuran en la tabla adjunta:

Caso 1	Caso 2
$L_d = 3{,}171$ m	$L_d = 3{,}171$ m
L_t = ¿? (0 m, si se esparce la tierra uniformemente sin formar caballón)	$L_t = 4{,}300$ m
$L_{tot} = 3{,}171$ m	$L_{tot} = 7{,}471$ m
$B_{tot} = 2{,}719$ m	$B_{tot} = 6{,}406$ m
$D = 10{,}8$ m	$D = 17{,}4$ m
af = 25,2 (porcentaje)	*af* = 36,8 (porcentaje)

R5: La disponibilidad hídrica (promedio) se obtiene como la semisuma de la correspondiente al área de impluvio y al área de recepción, pues los árboles abarcan con sus raíces ambas zonas por igual, según el enunciado. Así pues, y usando el programa MODIPÉ, se obtienen los resultados siguientes para *PIMP* y *DESP* (disponibilidad hídrica en el área de impluvio y en el área de recepción, respectivamente):

Caso 1	Caso 2
$P = 30$ mm (con $J = 2$)	$P = 30$ mm (con $J = 2$)
ANTES = 22,5 mm	*ANTES* = 22,5 mm
PIMP = 22,5 mm	*PIMP* = 20,8 mm
DESP = 97,2 mm	*DESP* = 133,6 mm
Media = 59,8 mm	Media = 77,2 mm

Comprobamos que, gracias a la recolección de agua, el arbolado dispone en sus raíces de un equivalente a 59,8 l/m^2 (caso 1) o a 77,2 l/m^2 (caso 2) frente a los 30 mm del aguacero o a los 22,5 l/m^2 que quedarían en la ladera antes de la intervención proyectada. La frontera entre el área de impluvio y el área de recepción es siempre un tanto arbitraria. La vegetación (con sus raíces) es quien marca la línea real entre ambas zonas a nivel ecohidrológico y microclimático.

Ejemplo 6

Una labor agrícola y de restauración ecológica desarrollada en el Sur de Arizona (EEUU) es el denominado "land imprinting" (Dixon, 1980; Dixon, 1983), que podemos traducir como estampado de terrenos. Mediante un rodillo especial dotado con dientes prismatoides y con el peso adecuado[5], se graba sobre el terreno un microrrelieve lleno de pequeñas pocetas (trampas de agua), que impiden la escorrentía, favorecen la infiltración y concentran el agua y las semillas en el fondo de tales alcorques. El rodillo puede ser lastrado a conveniencia según las características del terreno mediante tierra o agua. A su vez, el rodillo puede llevar una sembradora combinada sencilla, de manera que junto al estampado se siembra la mezcla de simientes que se considere más oportuna. El método ha sido aplicado con éxito en grandes extensiones en el desierto de Sonora y zonas aledañas (Dixon & Carr, 2004). El objetivo habitual ha sido el de favorecer a las plantas herbáceas perennes frente a las anuales para lograr así mejores pastaderos y forrajes, en lugares degradados con anterioridad por sobrepastoreo. Pero pueden sembrarse igualmente plantas leñosas nativas que favorezcan la sucesión vegetal progresiva.

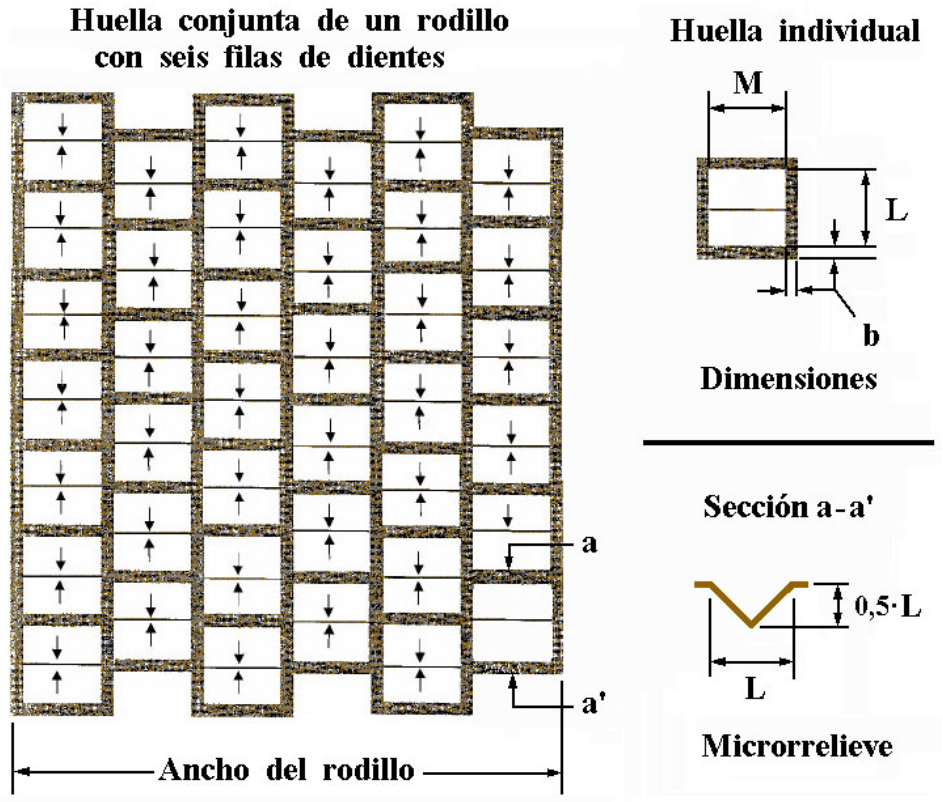


Figura 37: Estampado que deja en el suelo una revolución del rodillo y detalles de una poceta (fuente: Dixon & Carr, 2004)

En la figura 37 se esquematiza la huella de labor que deja un rodillo estampador. Por la disposición de sus dientes, los microembalses quedan alternos, lo que dificulta la formación de regueros (en el caso de que las lluvias excedan la precipitación límite de la preparación del suelo). Se trata de una configuración geométrica formada por hoyos

[5] (entre 2 y 4 toneladas para un rodillo de 0,5 m de diámetro y 2,5 m de anchura, lo que genera una presión estática media sobre el suelo de 100 a 200 kPa)

rectangulares (o cuadrados) en superficie y de sección triangular (en V), que perdura en el tiempo hasta que se producen en el semidesierto las lluvias necesarias para la nascencia y el crecimiento de las plantas.

La intervención puede parecer a primera vista bastante agresiva, pero en realidad respeta mucho más a la vegetación preexistente que los laboreos tradicionales (arado, binado, subsolado, ripado) con la ventaja adicional de no invertir horizontes ni enterrar los residuos vegetales superficiales. Además y por quedar el fondo de las cubetas en arista, el suelo tiende a agrietarse por lo que no se forman las temidas costras que tanto dificultan la nascencia en terrenos arcillosos.

El "land imprinting" puede considerarse como una modalidad de recolección de agua en la cual el área de impluvio es muy reducida ($S_I \approx 0$ m^2, en el límite). De hecho, se conforman alcorques contiguos (que hacen las veces de áreas de recepción) separados por pequeños caballones de tierra (que pueden asimilarse a las áreas de impluvio). En consecuencia, el funcionamiento hidrológico del estampado de suelos puede modelarse con MODIPÉ fácilmente. Veamos un ejemplo.

Utilizando las dimensiones estándar del apero descritas por Dixon & Carr (2004) y si la labor va a tempero (suelo seco y con el peso adecuado en el rodillo), tendremos los siguientes datos de partida para el estampado del terreno:

Ancho superficial de las pocetas, L = 10'' (pulgadas): L = 0,254 m
Longitud superficial de los alcorques, M = 10'': M = 0,254 m (= L)
Profundidad de las pocetas, $H = L/2 =$ 5'': H = 0,127 m
Espesor superficial de los caballones separadores, b = 2'': b = 0,0508 m

Como números de curva pueden usarse los siguientes:

NAC = 93 (correspondiente a un herbazal con algo de matorral en condición hidrológica pobre sobre suelo de tipo D (por alisado y sellado superficial) en zonas áridas de EEUU; véase el apéndice 2)

Número de curva del área de impluvio igual al número de curva del área de recepción: $NI = NR$. Aquí caben tres supuestos:

a) que la labor aumente el número de curva respecto a la situación de partida (NAC), p. ej.: $NI = NR$ = 94 (debido a la compactación del rodillo)
b) que la labor mantenga el número de curva: $NI = NR$ = 93 (hipótesis neutra)
c) que la labor disminuya el número de curva; p. ej.: $NI = NR$ = 87 (equivalente a un herbazal con algo de matorral en condición hidrológica pobre pero sobre un suelo de tipo C; apéndice 2)

1) Estime el tamaño de la unidad sistematizada, del área de recepción y del área de impluvio.
2) Halle la capacidad que tiene cada poceta.
3) ¿Qué precipitación máxima puede ser retenida mediante este estampado del terreno si el suelo fuese totalmente impermeable (N = 100)?

4) ¿En qué medida se altera el resultado anterior para las tres situaciones consideradas: a), b) y c) y una condición media de humedad antecedente? Opérese para estos cálculos con el programa MODIPÉ, tanto con los datos de una unidad sistematizada como con datos mayores, correspondientes a cien pocetas. ¿Se alteran los resultados del programa?
5) Ante un aguacero estándar de 30 l/m^2 con condiciones medias de humedad (J = 2), ¿qué pasa en la parcela degradada inicial, y en la ladera estampada? Supóngase el caso $NAC = NI = NR = 93$. ¿Qué implicaciones ecohidrológicas tienen estos resultados?

R1: El tamaño de la unidad sistematizada se corresponde con el tamaño de la poceta más la mitad de la superficie de los caballones que rodean a la poceta, y que hacen las veces de área de impluvio. Así pues:

$$S = L \cdot M + \frac{2 \cdot b \cdot L + 2 \cdot b \cdot M + 4 \cdot b^2}{2} = L \cdot M + b \cdot (L + M + 2 \cdot b)$$

Sustituyendo valores y operando:

$$S = 0{,}254^2 + 0{,}0508 \cdot (0{,}254 + 0{,}254 + 2 \cdot 0{,}0508) = 0{,}064516 + 0{,}0309676$$

$$S = 0{,}0954836 \text{ m}^2$$

El número de estampados individuales que entran en una hectárea es:

$$n = {}^{10.000}\!/_{S} = 104.730$$

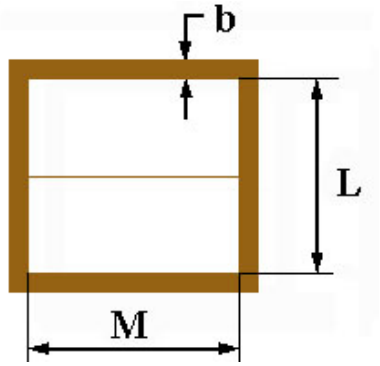


Figura 38: Unidad sistematizada individual

El área de recepción vale: $S_2 = L \cdot M = 0{,}254^2 = 0{,}064516$ m^2

El área de impluvio vale: $S_1 = b \cdot (L + M + 2 \cdot b) = 0{,}0309676$ m^2

La relación entre el área de impluvio y el área de recepción vale $R = {}^{S_1}\!/_{S_2} \approx 0{,}48$. Se trata de un valor pequeño pues – fundamentalmente – con el estampado de suelos lo que se persigue es la infiltración del agua de lluvia in situ (es decir: sin redistribución por escorrentía superficial).

R2: El tamaño del microembalse se deja obtener muy fácilmente a partir de consideraciones geométricas elementales (figura 39):

$$CAPA = \frac{1}{2} \cdot L \cdot H \cdot M$$

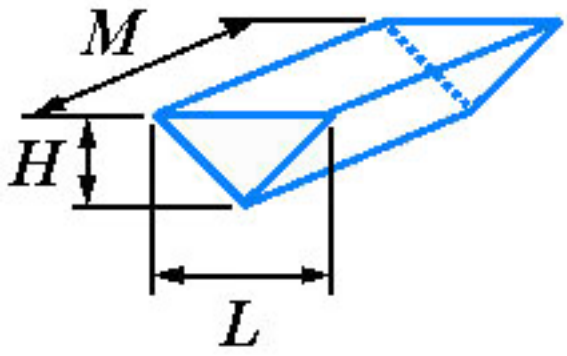


Figura 39: Perspectiva de un alcorque estampado con el rodillo de un "land imprinter"

En el caso que nos ocupa:

$$CAPA = \frac{1}{2} \cdot L \cdot H \cdot M = \frac{1}{2} \cdot L \cdot L/2 \cdot L = \frac{1}{4} \cdot L^3 = 0{,}25 \cdot 0{,}254^3 = 4{,}097 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$CAPA = 4{,}1 \text{ litros}$$

R3: La precipitación máxima que puede ser retenida bajo el supuesto de suelo totalmente impermeable puede hallarse de dos maneras diferentes: Una, trabajando con el programa MODIPÉ, suponiendo que todos los números de curva valen cien y yendo al valor de la precipitación límite (al umbral de escorrentía de la unidad sistematizada).

La segunda manera es más directa y elegante: Consiste en hallar el cociente $CAPA/S$, valor que coincide con la precipitación máxima solicitada (véase la cuestión 10, en donde se demuestra este hecho).

$$P2 = \frac{CAPA}{S} = \frac{4{,}1}{0{,}0954836} = 42{,}9 \ \ l/m^2$$

Un aguacero de 42,9 mm llena los microembalses de la estampación al máximo, para un suelo completamente impermeable.

R4: La precipitación límite aumenta respecto al caso precedente (de suelos impermeables). Esta precipitación límite será mayor en el caso c) [con números de curva menores), intermedia en el caso b) y menor en el caso a) [con números de curva mayores].

Los resultados no se alteran si se trabaja con una unidad sistematizada aislada o con los valores correspondientes a cien estampados juntos, por el tratamiento numérico que realiza MODIPÉ (Martínez de Azagra, 2004). En el primer caso, los tamaños de las áreas (S, S_1 y S_2) son tan pequeños que el programa los redondea en apariencia aunque opera con todas las cifras decimales para obtener los resultados.

Los datos de entrada para cien estampados serán:

$$S_1 = 100 \cdot 0{,}0309676 = 3{,}09676 \ \text{m}^2$$

$$S_2 = 100 \cdot 0{,}064516 = 6{,}4516 \ \text{m}^2$$

$$CAPA = 100 \cdot 4{,}1 = 410 \ \text{litros}$$

Introduciendo estos valores en el programa obtenemos para el caso c) $NI = NR = 87$, las siguientes pantallas:

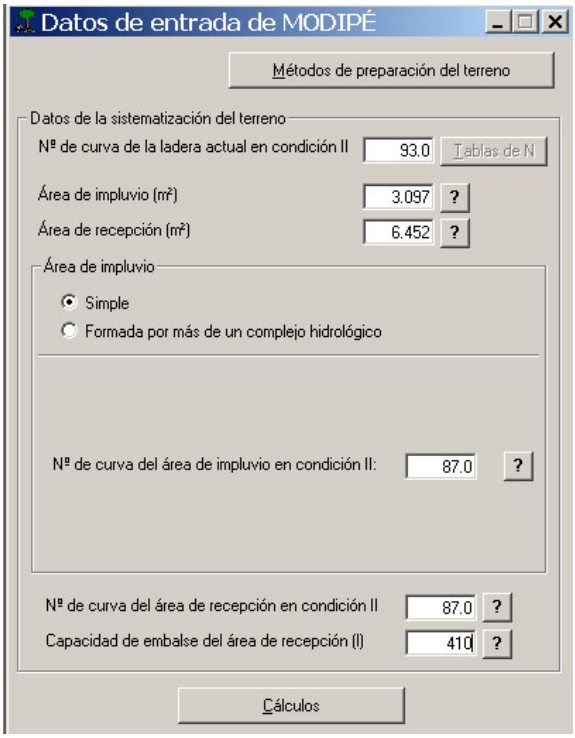
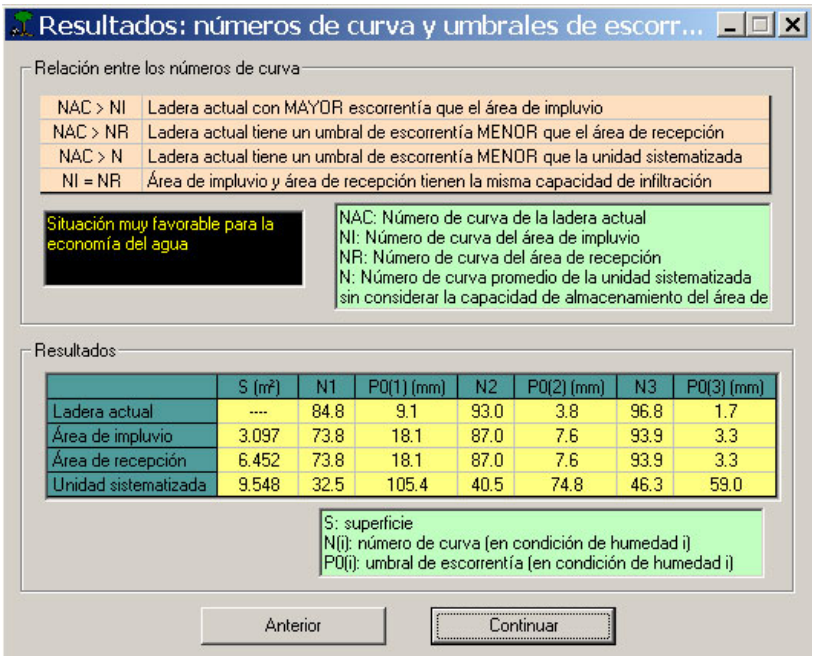


Figura 40: Volcado de pantalla de MODIPÉ 2.0 con los datos de entrada



	S (m²)	N1	P0(1) (mm)	N2	P0(2) (mm)	N3	P0(3) (mm)
Ladera actual	----	84.8	9.1	93.0	3.8	96.8	1.7
Área de impluvio	3.097	73.8	18.1	87.0	7.6	93.9	3.3
Área de recepción	6.452	73.8	18.1	87.0	7.6	93.9	3.3
Unidad sistematizada	9.548	32.5	105.4	40.5	74.8	46.3	59.0

Figura 41: Volcado de pantalla con los resultados principales del modelo MODIPÉ

Resolviendo los tres casos planteados, se obtienen los resultados que resumimos a continuación en la tabla siguiente:

Tabla 12: Precipitación límite para la sistematización planteada ("land imprinting" estándar)

Caso	*NI* = *NR* (adimensional)	Precipitación límite (con *J* = 2)
o	100	42,9 mm
a	94	58,7 mm
b	93	61,1 mm
c	87	74,8 mm

Vemos que los umbrales de escorrentía de la preparación del suelo considerada (un "land imprinting" estándar) son muy elevados: Valen 58,7 (caso a), 61,1 (caso b) y 74,8 l/m^2, lo que asegura un comportamiento endorreico para la práctica totalidad de los aguaceros que puedan presentarse.

Con el paso de los meses, el estampado irá desdibujándose por los efectos de la lluvia y del viento, con lo que las trampas de agua dejarán de ser tan eficaces como al principio. La precipitación límite (debido a la microtopografía) irá disminuyendo. Pero el efecto beneficioso de la vegetación instalada puede compensar el proceso de atenuación natural del microrrelieve, con lo que la restauración podrá ser un éxito.

R5: Ante un aguacero de 30 mm el terreno degradado en ladera (*NAC* = 93) sólo aprovecha 14,9 mm (es decir: menos de la mitad de la lluvia: *ANTES* = 14,9 mm; véase la figura 42). El resto se pierde por escorrentía, lo que provoca pérdidas de suelo, de nutrientes y de semillas (además de pérdidas de agua). El ecosistema está enfermo, tanto que una lluvia copiosa como la descrita, lejos de beneficiarlo, lo perjudica.

Con el estampado del terreno la situación cambia sustancialmente. La lluvia de 30 l/m^2 es aprovechada al 100% (*PROM* = 30 mm). Además, se produce una redistribución del agua que favorece a las áreas de recepción: La disponibilidad hídrica en estas áreas vale 37,3 l/m^2 (*DESP* = 37,3 mm). El ecosistema está en condiciones de iniciar su evolución progresiva. El "land imprinting" propicia este proceso desde el punto de vista de la economía del agua, cuestión crucial en zonas semidesérticas.

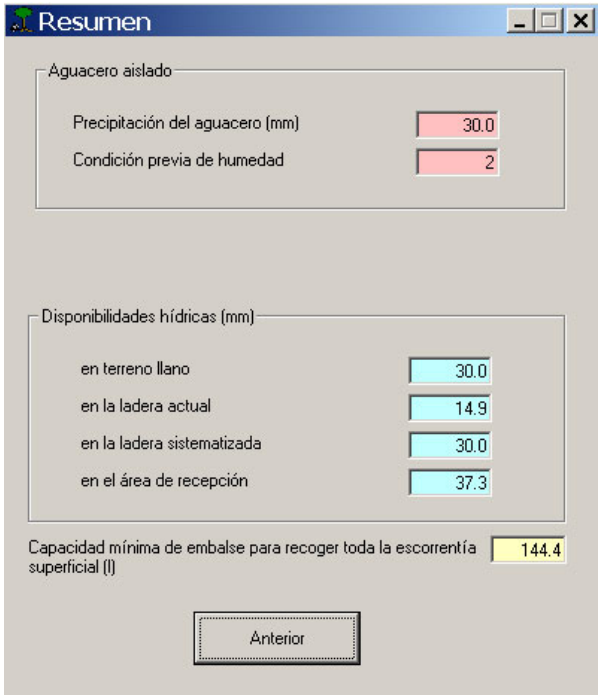


Figura 42: Disponibilidades hídrica generadas por un aguacero de 30 mm y condición previa de humedad intermedia (*P* = 30 l/m^2; *J* = 2)

Ejemplo 7

Una técnica tradicional de cultivo agrícola en la región del Sahel se denomina "zaï" (en Burkina Faso) o "tassa" (en Mali, Níger, Sudán). Consiste en hacer pequeños hoyos al tresbolillo por toda la parcela durante la estación seca (de noviembre a mayo) y sembrar en ellos mijo, zahína, caupí o maíz. Esta labor requiere mucha mano de obra, pues han de practicarse entre 10.000 y 20.000 hoyos por hectárea, lo que supone unas 200 o 300 horas de trabajo (si se realiza de forma manual, como suele ser el caso). Adicionalmente, el agricultor echa uno o dos puñados de estiércol (o de restos vegetales) en cada cubeta como abono y mejorante del suelo antes de las lluvias y de la siembra. Se da la circunstancia de que este estiércol (o los restos vegetales añadidos) atraen a ciertas hormigas (termitas) que establecen colonias y horadan numerosas galerías, lo que incrementa la capacidad de infiltración de las cubetas. Tanto esfuerzo merece la pena, pues de esta manera se consiguen rendimientos suficientes y más seguros dentro de la agricultura precaria y de subsistencia del Sahel.

Con el zai se concentra el agua de lluvia en los hoyos (recolección de agua) y se evita la escorrentía, la erosión y la degradación de los terrenos. Es una técnica muy eficiente para la restauración de suelos tropicales fuertemente encostrados y degradados (Roose *et al.*, 1993; Ouédraogo & Kaboré, 1996). Tan es así que con la técnica zai se consiguen recuperar terrenos totalmente yermos e infértiles para la agricultura. Incluso, con el paso de los años, reaparece vegetación leñosa de interés agropecuario y forestal (p.ej.: *Piliostigma reticulatum*, *Balanites aegyptiaca*, *Lannea microcarpa*, *Butyrospermum paradoxum*, etc.), lo que evidencia su efecto beneficioso para la lucha contra la desertificación. Se puede distinguir así entre el zai puramente agrícola y el zai forestal (Sawadogo *et al.*, 2001; Koutou *et al.*, 2007), en el que se respetan los árboles que van naciendo en los hoyos. Estos brinzales provienen de semillas contenidas en el estiércol, traídas por el viento y la lluvia, o directamente sembradas por el agricultor.

La geometría y la microtopografía de la preparación zai queda descrita fijando el tamaño y la profundidad de sus hoyos y su equidistancia (figura 43). Suele tratarse de cubetas circulares de 20 – 40 cm de diámetro y 10 – 20 cm de profundidad distanciadas 0,7 a 1,2 m entre sí.

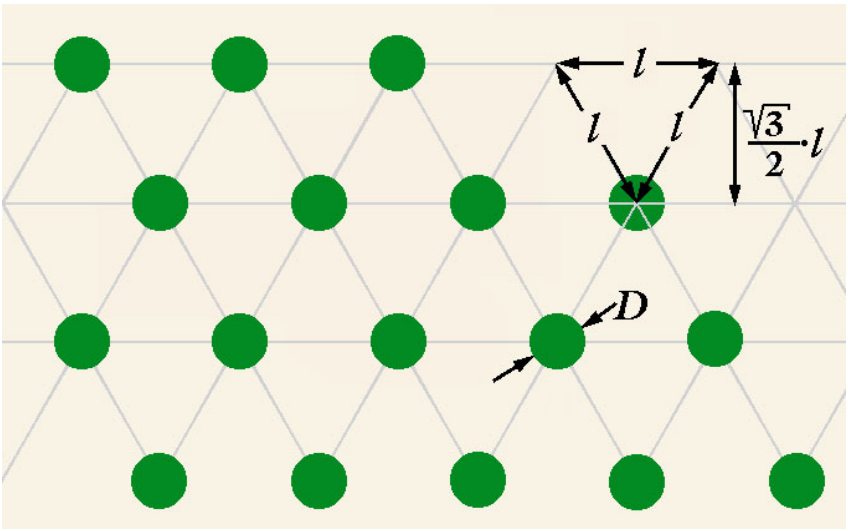


Figura 43: Esquema de la distribución al tresbolillo de los zais
(l = distancia entre hoyos; D = diámetro de los hoyos)

Los efectos hidrológicos de la técnica zai pueden ser modelados y evaluados con MODIPÉ, lo que puede ayudar a mejorar esta preparación del suelo (dando pautas concretas sobre el tamaño más conveniente de los microembalses y sobre su espaciamiento en función de las lluvias, del terreno y del cultivo a implantar).

El caso que vamos a estudiar queda definido por los siguientes datos:

- Zais al tresbolillo equidistanciados un metro (l = 1 m)
- Hoyos de 30 cm de diámetro y 20 cm de profundidad (D = 0,3 m; H = 0,2 m)
- Suelo yermo, muy degradado y encostrado con un número de curva de 94 ($NAC(2)$ = 94; barbecho desnudo con tipo de suelo D)
- Suelo del hoyo estercolado y mejorado por la acción de las termitas, lo que se traduce en una disminución de su número de curva: $NR(2)$ = 90 (barbecho con residuos en condición hidrológica buena, suelo D). Si la actividad de las termitas es notoria el número de curva del hoyo puede llegar a valer menos de noventa (88, si se pasa a tipo de suelo C, y 83, si se pasa a tipo de suelo B. Véase el apéndice 1.)

1) Determine el tamaño de una unidad sistematizada, su área de impluvio y su área de recepción. ¿Qué relación guardan estas dos áreas?
2) Fije el tamaño de una trampa de agua.
3) ¿Qué precipitación límite poseerá la sistematización en el caso de que el terreno sea totalmente impermeable?
4) Concrete e introduzca los datos de entrada que precisa el programa MODIPÉ.
5) Interprete los resultados que ofrece el programa antes de trabajar con aguaceros.
6) Mediante la aplicación informática MODIPÉ determine ¿qué efecto es más ostensible para la economía del agua: el aumento del tamaño de los hoyos o la disminución del número de curva en el área de recepción gracias a la acción de las termitas?
7) Analice las disponibilidades hídricas que genera la serie estándar de aguaceros siguiente: P_1 = 10 mm (con J = 1); P_2 = 20 mm (con J = 2) y P_3 = 30 mm (con J = 3) en el terreno degradado, en el área de recepción y en el promedio de la sistematización.

R1: Por la disposición al tresbolillo, la superficie correspondiente a cada hoyo (es decir: el tamaño de la unidad sistematizada) valdrá:

$$S = \sqrt{3}/2 \cdot l^2$$

Sustituyendo valores (l = 1 m):

$$S = 0{,}866 \text{ m}^2$$

El número de hoyos a abrir en una hectárea será:

$$n = 10.000/S = 11.547 \text{ zais (hoyos)}$$

El tamaño superficial del hoyo vale: $S_2 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 0{,}071 \text{ m}^2$

y se corresponde con el área de recepción.

En consecuencia, el área de impluvio (S_1) puede estimarse en:

$$S_1 = S - S_2 = 0{,}866 - 0{,}071 = 0{,}795 \text{ m}^2$$

De igual manera, se puede calcular S_1 a partir de la ecuación:

$$S_1 = \frac{10.000 - n \cdot S_2}{n} = \frac{10.000 - 11.547 \cdot 0{,}071}{11.547} = 0{,}795 \text{ m}^2$$

La relación entre el área de impluvio y el área de recepción vale:

$$R = \frac{S_1}{S_2} = \frac{0{,}795}{0{,}071} = 11{,}2$$

Nota: Aunque la escorrentía de las zonas que quedan entre los hoyos no esté claramente dirigida hacia una cubeta concreta (pues no se hacen caballones guía), la gran cantidad de zais (más de uno por metro cuadrado) y su relativo gran tamaño ($D/l > 0{,}25$) permiten que se pueda admitir –de promedio– que S_1 y S_2 son los calculados anteriormente. Pero en el caso de que los hoyos se espacien mucho entre sí y no se perfilen caballones guía, para modelar la preparación del suelo hay que distinguir tres áreas diferentes: el área de impluvio (S_1), el área de recepción (S_2) y el área de los pasillos de escorrentía (S_3). Estaremos ante una sistematización primaria incompleta o parcial (véase la cuestión 11 y el penúltimo apartado del formulario). En el ejercicio siguiente se desarrolla un caso de sistematización incompleta.

R2: El tamaño de la trampa de agua puede estimarse considerando que el hoyo tiene forma de medio elipsoide, cuyos radios son: $r_1 = r_2 = \frac{D}{2}$ y $r_3 = H$.

$$V = 0{,}5 \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot r_3$$

Sustituyendo valores y operando, se tiene:

$$CAPA = V = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot 0{,}15 \cdot 0{,}15 \cdot 0{,}2 = 0{,}009424778 \text{ m}^3$$

Pasando este resultado a litros y redondeando (por exceso, pues no hemos considerado que el hoyo se recrece con la tierra extraída formando un caballón; véase la foto adjunta), se tiene:

$$CAPA = 10 \text{ litros}$$

Foto: Vista de un campo cultivado en el norte de Burkina Faso mediante la técnica zai (autor: M. Koutou)

R3: La precipitación límite (*P2*) para el caso de un terreno totalmente impermeable ($N = 100$) coincide con el cociente $\frac{CAPA}{S}$ (como hemos demostrado en la cuestión número 10):

$$P2 = \frac{CAPA}{S} = \frac{10}{0{,}866} = 11{,}5 \text{ l/m}^2$$

R4: Los datos de entrada de MODIPÉ son:

$NAC = 94$	$NI = 94$	$NR = 90$ (88 u 83)
$S_1 = 0{,}795$ m^2	$S_2 = 0{,}071$ m^2	$CAPA = 10$ litros

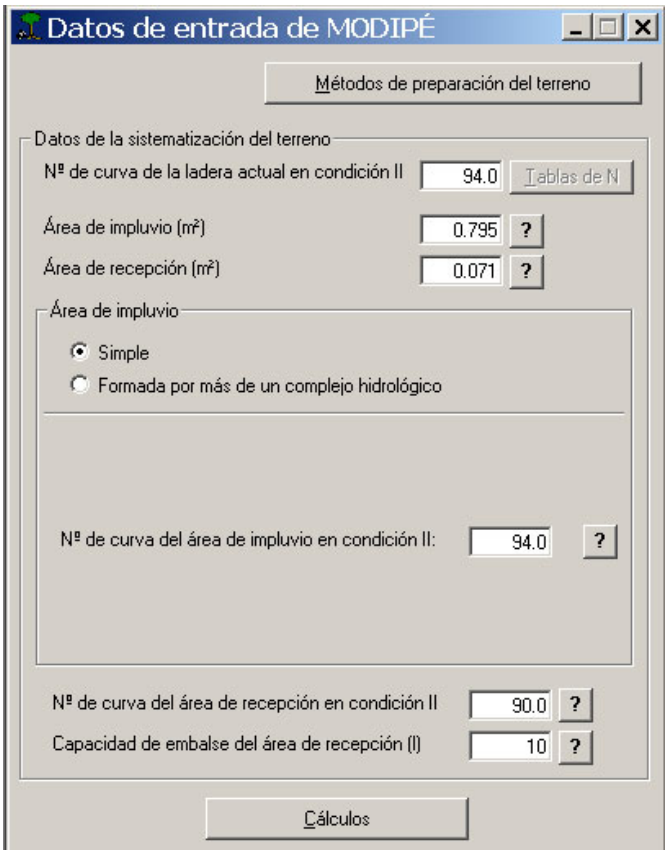


Figura 44: Volcado de pantalla de MODIPÉ 2.0 con los datos de entrada

R5: Los comentarios se refieren a unas condiciones medias de humedad (J = 2), aunque cabe hacer las mismas consideraciones para J = 1 (suelo seco) y para J = 3 (suelo húmedo).

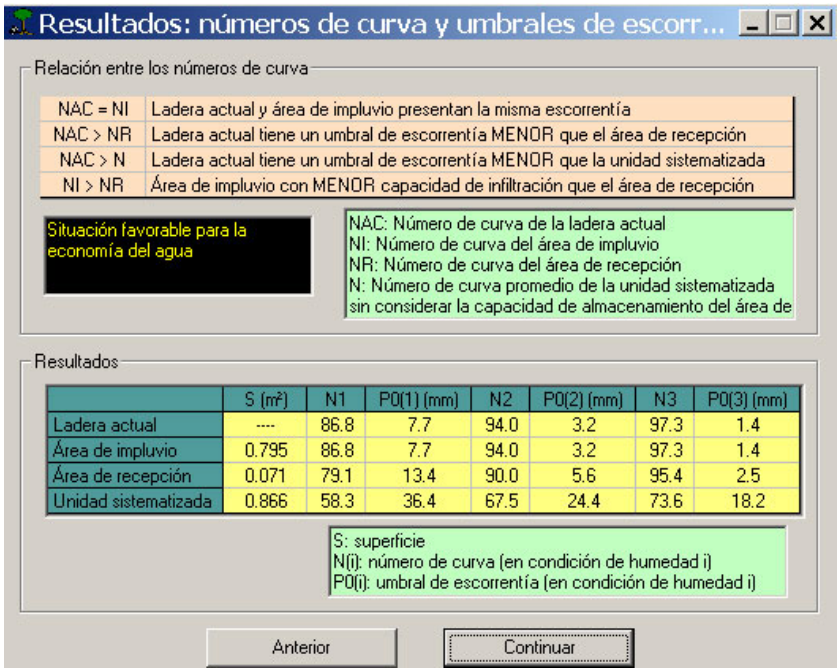
El umbral de escorrentía del terreno (y del área de impluvio) es muy bajo por tratarse de suelos yermos y encostrados (figura 45):

$$NAC = NI = 94 \quad \Leftrightarrow \quad PAC = P1 = 3{,}2 \text{ l/m}^2$$

Prácticamente cualquier aguacero genera escorrentía en la parcela. Siempre que la precipitación sea superior a 3,2 l/m^2 (P > 3,2 mm) habrá escorrentía con J = 2.

En la figura 45 vemos que la precipitación límite ($P2$) de la sistematización primaria zai vale 24,4 l/m^2 con lo que la parcela puede infiltrar las lluvias mucho mejor. Todos los aguaceros con una precipitación comprendida entre 3,2 y 24,4 mm se aprovecharán al 100% (lo que no ocurre con el terreno degradado, liso y sin ahoyar).

A su vez, los hoyos recibirán escorrentía de las áreas de impluvio lo que favorecerá el nacimiento, crecimiento y producción de las plantas que se siembren en cada cubeta.



	S (m²)	N1	P0(1) (mm)	N2	P0(2) (mm)	N3	P0(3) (mm)
Ladera actual	----	86.8	7.7	94.0	3.2	97.3	1.4
Área de impluvio	0.795	86.8	7.7	94.0	3.2	97.3	1.4
Área de recepción	0.071	79.1	13.4	90.0	5.6	95.4	2.5
Unidad sistematizada	0.866	58.3	36.4	67.5	24.4	73.6	18.2

Figura 45: Volcado de pantalla con los resultados principales del modelo MODIPÉ

En el Sahel, los periodos de lluvias se concentran de manera que muchas tormentas caen sobre suelo mojado (en condición $J = 3$). En esta situación de humedad antecedente, el distinto comportamiento del terreno degradado liso frente al terreno laboreado mediante zais es aún más acusado: $PAC(3) = 1{,}4$ l/m^2 frente a $P2(3) = 18{,}2$ l/m^2. Ello explica que practicando hoyos se obtengan buenas cosechas de mijo o sorgo mientras que si no se perfilan trampas de agua la cosecha sea en muchos años ruinosa por falta de agua en el suelo.

R6: Para responder a esta cuestión vamos a considerar dos casos:

A) Aumento de 1a capacidad del microembalse en 5 litros (quedando el resto de parámetros inalterado): $CAPA = 15$ l (en vez de 10 litros)

B) Disminución del número de curva del área de recepción en 7 puntos (cambio desde $NR = 90$ [tipo de suelo D] hasta $NR = 83$ [tipo de suelo B]) (quedando el resto de parámetros inalterado) (véase el barbecho en la tabla del apéndice 1).

Comparando la precipitación límite de ambos casos podremos inferir frente a cuál de los dos parámetros es más sensible la técnica zai (y el modelo MODIPÉ).

Los resultados obtenidos al correr el programa se muestran en la tabla 13.

Tabla 13: Sensibilidad de la técnica zai frente a los cambios de *CAPA* y de *NR*

Caso	***P2*(2)** (en mm)	**Incremento unitario** * (respecto al valor de referencia: $P2 = 24{,}4$ mm
A) Aumenta *CAPA*	31,4	1,4 mm/litro
B) Disminuye *NR*	25,4	$\frac{1}{7}\ \frac{mm}{n^o\ de\ curva}$

* Nota: $1{,}4 = \frac{31{,}4 - 24{,}4}{15 - 10}$ $\frac{1}{7} = \frac{25{,}4 - 24{,}4}{90 - 83}$

Conforme a estos datos, podemos concluir que el sistema zai es especialmente sensible a *CAPA*. Con pequeños incrementos de la trampa de agua se consigue un efecto más beneficioso (en cuanto a posibilidades de endorreísmo) que con la actividad positiva del estiércol y las hormigas (cuyo efecto hemos estimado en una disminución máxima de *NR* de siete puntos (*NR* = 90 → *NR* = 83)). Se comprende que los agricultores pongan especial atención en realizar las cubetas depositando la tierra de manera que el caballón recrezca el hoyo y aumente su capacidad de almacenar agua. Con todo, la acción beneficiosa de las termitas no debe desdeñarse en absoluto pues incide favorablemente en la economía del agua y –sobre todo– en la nutrición de la planta (suelos más sueltos, aireados; nutrientes más fácilmente asimilables, etcétera).

R7: Los resultados que ofrece MODIPÉ (2.0) aparecen reflejados en las dos figuras siguientes.

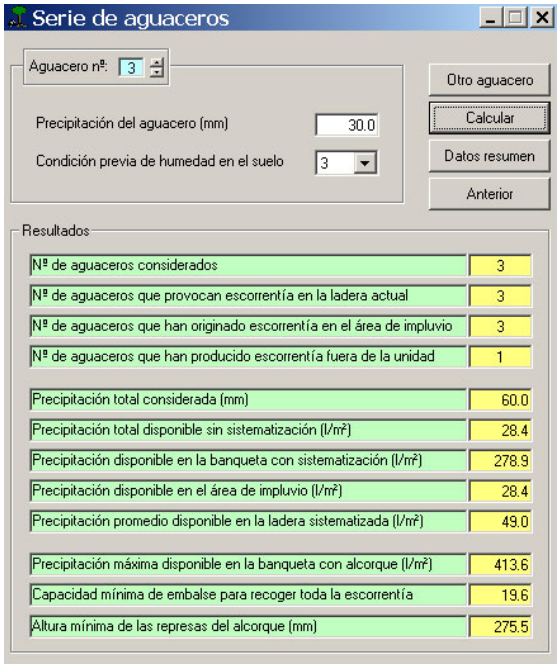


Figura 46: Volcado de pantalla con las disponibilidades hídricas provocadas por la serie estándar de aguaceros

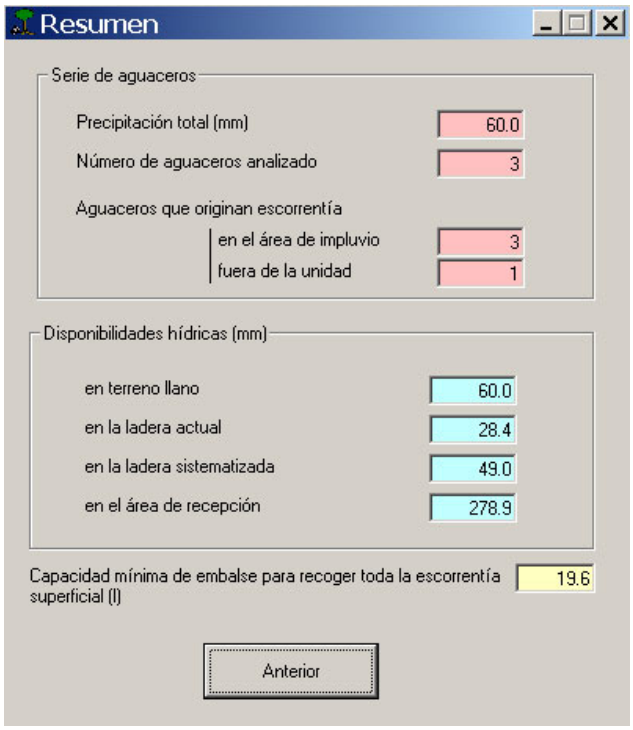


Figura 47: Volcado de pantalla con el resumen de resultados sobre disponibilidades hídricas

Caen en total 60 l/m^2 ($\sum_{i=1}^{i=3} P_i = 60$ mm). De esta cantidad, la parcela degradada sin intervenir sólo aprovecha 28,4 mm (¡menos de la mitad de la lluvia!).

Con el ahoyado zai se consiguen 49 l/m^2 (*PROM* = 49 mm), 20,6 l/m^2 más que en la situación inicial. No se aprovecha la totalidad de la lluvia de los tres aguaceros. Para ello haría falta un hoyo con una capacidad mínima de 19,6 litros (*CAPAL* = 19,6 l), en lugar de los diez litros considerados (*CAPA* = 10 l) (véase la figura 47).

La recolección de agua en los hoyos hace que la disponibilidad hídrica en ellos sea muy elevada (*DESP* = 278,9 mm). Este hecho facilita el crecimiento de las plantas sembradas en la cubeta (especialmente, el de sus raíces pivotantes siguiendo a la humedad). Sin embargo, conviene señalar que al ser el área de recepción tan pequeña (S_2 = 0,071 m^2), la rizosfera del cultivo prospecta también el área de impluvio, de manera que la disponibilidad hídrica a considerar es *PROM* = 49 mm (aunque el reparto del agua resulte ventajoso para la vida de las plantas en los hoyos).

Ejemplo 8

Numerosas técnicas de preparación del suelo con vistas a repoblar laderas no son areales ni lineales, sino puntuales. Tal es el caso de los ahoyados, que pueden realizarse tanto a mano como mecánicamente (con retroexcavadora, con barrena, con brazos de subsolador modificados o con aperos específicos) (Serrada, 1993; Monsalve *et al*., 1995; Pemán & Navarro, 1998). En estas intervenciones y a unas distancias prefijadas por el proyectista se excava la tierra y se abren unos hoyos en donde se plantan las especies previstas en el proyecto, generalmente árboles (y arbustos) de una o de dos savias. El volumen de suelo removido interesa que sea grande (sobre todo en suelos esqueléticos bajo climas con periodos secos) para procurar unas buenas condiciones de vida a los brinzales en sus primeros años de arraigo, instalación y consolidación. Como valor estándar suele utilizarse un volumen de 0,4·0,4·0,4 m^3 ($a \cdot b \cdot p$), aunque las labores mecanizadas permiten ser más generosos en la remoción de la tierra, tanto en superficie ($a \cdot b > 0{,}4 \cdot 0{,}4\ m^2$) como en profundidad ($p > 0{,}4$ m).

En regiones áridas y semiáridas merece la pena prestar atención a otros dos datos importantes para el éxito de la intervención restauradora. Si el clima trae pocos pero intensos chubascos, interesa perfilar un alcorque en cada hoyo (*CAPA*) para que el agua de lluvia se infiltre en los derredores de la planta junto con el agua de escorrentía proveniente de áreas de impluvio más o menos extensas (recolección de agua). Para este cometido el modelo MODIPÉ resulta muy útil, pues permite fijar el tamaño del microembalse con criterios hidrológicos (condición de endorreísmo para el aguacero de cálculo). Se ha de cumplir que:

$$CAPA \geq E_s \cdot (S_1 + S_2)$$

siendo E_s la escorrentía media que provoca la precipitación de cálculo en el área de impluvio (S_1) y en el área de recepción (S_2) del hoyo considerado.

La tercera decisión técnica, igualmente ligada a las disponibilidades hídricas del repoblado, se refiere a la disyuntiva entre realizar una sistematización primaria plena o, por el contrario, una sistematización primaria incompleta. En este ejercicio vamos a abordar esta interesante cuestión, que también afecta a la densidad de repoblación.

La superficie puesta a disposición de cada planta (S_p) depende del marco de plantación, es decir, de la densidad de la repoblación:

$$S_p = \frac{10.000}{n}$$ siendo n el número de pies plantados por hectárea.

Por otra parte, el tamaño de la unidad sistematizada (S) es la suma del área de impluvio (S_1) y del área de recepción (S_2):

$$S = S_1 + S_2$$

Como ya hemos comentado con anterioridad (en la cuestión 11), una sistematización primaria se denomina plena o completa cuando asegura que toda la escorrentía del marco de plantación (S_p) llegue al área de recepción. En caso contrario se habla de sistematización primaria incompleta o parcial. En esta última alternativa la obtención de cosechas de agua pasa a un segundo plano, puesto que una parte de la escorrentía generada en la ladera no se dirige obligatoriamente hacia los alcorques, pudiéndose perder (véase la figura 48). Para decantarse entre una u otra opción hay que

estudiar tanto el clima del lugar (un año o una primavera de cálculo) así como las condiciones hidrológicas de la ladera (sus números de curva: *NAC*, *NI* y *NR*). Fijada una disponibilidad hídrica objetivo para el repoblado (con el fin de evitar marras y/o conseguir buenos crecimientos) hay que decantarse por la alternativa que procure los aportes hídricos deseados ante la serie de precipitaciones de cálculo. Y esta decisión sólo puede hacerse de una manera fundada acudiendo a un modelo sobre recolección de agua como MODIPÉ.

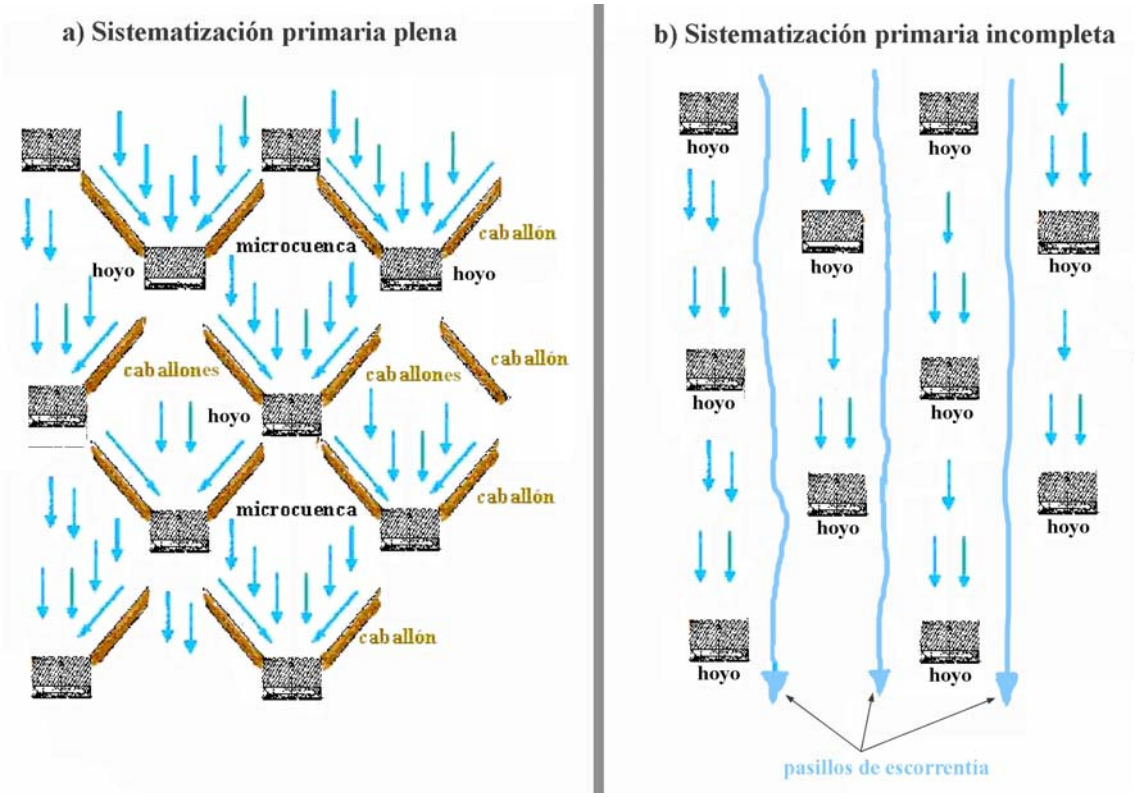


Figura 48: Sistematización primaria plena (a) e incompleta (b)

En parcelaciones completas el tamaño de la unidad sistematizada (S) coincide con la superficie destinada a cada planta (S_p). No ocurre así en sistematizaciones primarias incompletas, pues existen pasillos de escorrentía (S_3) que reducen el tamaño de la unidad sistematizada respecto de la superficie puesta a disposición para cada planta (S_p).

Así, tenemos que:

- para una sistematización completa: $S = S_1 + S_2 = S_p$
- para una sistematización primaria incompleta: $S = S_1 + S_2 < S_p$

$$S_1 + S_2 + S_3 = S_p$$

No todas las preparaciones del suelo generan una sistematización primaria plena (o completa). Cuando una parte de la superficie disponible para cada planta no actúa ni como área de impluvio ni como área de recepción, estamos ante una sistematización primaria incompleta (o parcial), como ha quedado dicho. Este es el caso de los ahoyados, si no se realizan unos caballones (o regueros) guía que conduzcan la escorrentía hacia el hoyo (figuras 48 a y b). Por ejemplo, una técnica de preparación del

suelo muy utilizada actualmente en Castilla y León en forestaciones de laderas (en sustitución de los aterrazados) es el ahoyado mecanizado con 'bulldozer' (Torre, 1995), en donde cabe identificar unos pasillos de escorrentía ajenos al sistema de recolección de agua.

Mientras que las sistematizaciones primarias completas pueden resolverse directamente aplicando el programa MODIPÉ, en las sistematizaciones parciales la cuestión no es tan inmediata. Las consideraciones y ecuaciones que vamos a desarrollar en este ejercicio resuelven la cuestión, de manera que el campo de aplicación del modelo MODIPÉ se amplía a este tipo de preparaciones del suelo.

En el caso que planteamos, el microembalse sólo aprovecha una parte de la escorrentía que se produce en la superficie que corresponde a cada planta ($S_p = 10.000/n$). Para estimar dicha porción hay que fijarse en la longitud de ladera que queda interceptada por los hoyos siguiendo una curva de nivel (es decir: hay que fijarse en la superficie que aporta obligatoriamente escorrentía al área de recepción, hay que determinar S_1). Esta área de impluvio resulta inferior a $S_p - S_2$, es decir: $S_1 < S_p - S_2$, como puede apreciarse en las figuras 49, 50 y 51. A la vista de estas figuras, pueden calcularse las superficies de la sistematización parcial como sigue:

$$S_p = \frac{10.000}{n} = S_1 + S_2 + S_3 = L \cdot D = \text{distancia entre líneas} \cdot \text{equidistancia entre hoyos}$$

$S_1 = a \cdot (D - b)$ Área de impluvio

$S_2 = a \cdot b$ Área de recepción

$S = S_1 + S_2 = a \cdot D$ Tamaño de la unidad sistematizada

$S_3 = (L - a) \cdot D$ Área de los pasillos laterales de escorrentía

$S_p = S_1 + S_2 + S_3 = a \cdot (D - b) + a \cdot b + (L - a) \cdot D = L \cdot D$ (comprobación)

siendo: S_p = superficie puesta a disposición de cada planta; n = densidad de repoblación (pies/ha); S_1 = área de impluvio; S_2 = área de recepción; S = tamaño de la microcuenca; S_3 = área de los pasillos laterales de escorrentía; a = anchura del área de recepción (de la banqueta u hoyo); b = longitud del área de recepción (banqueta, hoyo); D = equidistancia entre hoyos de una misma línea (de máxima pendiente); L = distancia entre líneas contiguas de hoyos

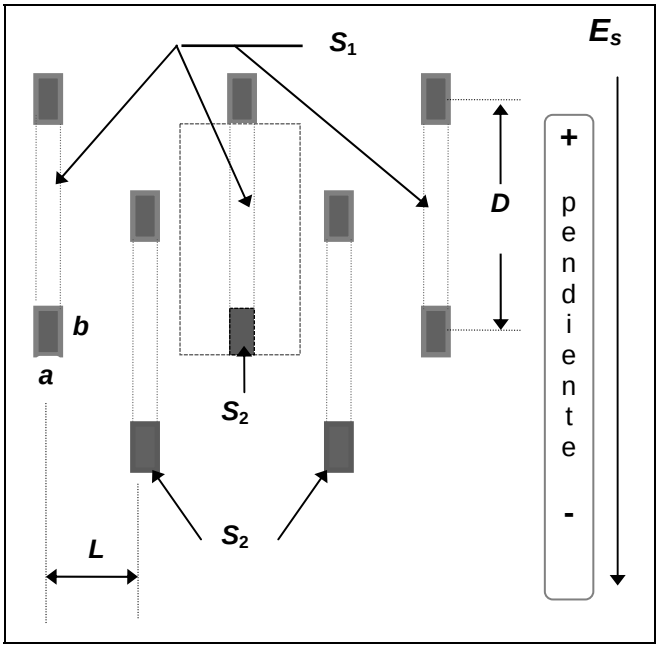


Figura 49: Esquema de una repoblación por hoyos al tresbolillo

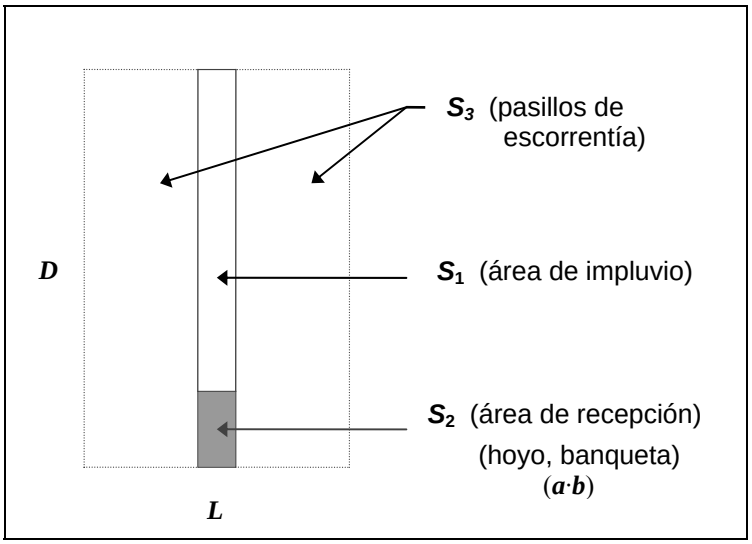


Figura 50: Unidad sistematizada y pasillos de escorrentía

Al no aprovechar toda la escorrentía, las pocetas (*CAPA*) pueden ser más pequeñas (pues no se pretende acumular tanta agua), pero habrá que dimensionarlas de acuerdo con el tamaño de la unidad sistematizada ($S_1 + S_2$). El hecho de que exista un porcentaje de escorrentía descontrolada (la correspondiente a los pasillos) redunda en:

- Unas menores cosechas de agua
- Un microclima de ladera 'menos pluvioso' que con una sistematización primaria plena (sobre todo en el área de recepción)
- Una cierta indeterminación del agua infiltrada como promedio en la ladera, pues existe aleatoriedad en el destino de la escorrentía generada en los pasillos (trampas de agua parciales)
- Un mayor riesgo en la formación de regueros y en la rotura de hoyos (por acumulación no prevista de escorrentía, procedente de mayores superficies, en algunos hoyos)

No obstante, la decisión adoptada puede ser técnicamente acertada e idónea (en zonas en las que las cosechas de agua no sean cruciales para la consecución de la repoblación, en lugares con aridez moderada y baja torrencialidad de lluvias). La restauración puede resultar igualmente exitosa y más barata en tales zonas (pues no hay que perfilar los caballones guía).

Cuanto más seco y torrencial sea un clima, cuanto mayores sean las necesidades hídricas que tenga la repoblación, o cuanto más riesgo de erosión hídrica tenga la ladera, más convendrá reducir los pasillos de escorrentía. Los pasillos de escorrentía siempre pueden suprimirse del todo (sea cual sea la densidad de plantación) mediante unas sencillas obras complementarias consistentes en unos caballones o regueros laterales que dirijan el agua de escorrentía hacia las áreas de recepción (véase la figura 48 a).

La forma de operar con MODIPÉ en los casos de sistematización parcial requiere distinguir entre tres números de curva diferentes. Al tener que considerar una nueva superficie (S_3) aparece un nuevo número de curva. Así, tendremos: *NAC* para la ladera actual, *NI* para el área de impluvio, *NR* para el área de recepción y *N3* para los pasillos de escorrentía (con *N3* = *NAC*, habitualmente).

Si se desea conocer la disponibilidad hídrica promedio en la ladera (*PROM3*) hay que considerar tanto lo que ocurre en la unidad sistematizada (en $S = S_1 + S_2$) como en los pasillos de escorrentía (en S_3). Una ponderación de la infiltración según superficies conduce a la disponibilidad hídrica promedio. Las tres ecuaciones que resuelven el problema son las siguientes:

$$P3 = 0{,}2 \cdot \frac{25.400 - 254 \cdot N3}{N3} = \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot N3}{N3}$$

$$PAS = P - T \cdot \frac{(P - P3)^2}{P + 4 \cdot P3} \quad \text{con } T = 0 \text{ si } P \le P3 \text{ y } T = 1 \text{ si } P > P3$$

$$PROM\,3 = \frac{PROM \cdot (S_1 + S_2) + PAS \cdot S_3}{S_1 + S_2 + S_3} = \frac{PIMP \cdot S_1 + DESP \cdot S_2 + PAS \cdot S_3}{S_p}$$

siendo: *P3* = umbral de escorrentía en los pasillos; *N3* = número de curva en los pasillos de escorrentía; PAS = disponibilidad hídrica en los pasillos de escorrentía; *T* = constante que vale uno o cero (según el caso); *PROM3* = disponibilidad hídrica promedio en la sistematización primaria incompleta (en la ladera, así intervenida, creando una sistematización parcial); *PROM* = disponibilidad hídrica promedio en la unidad sistematizada; S_1 = área de impluvio; S_2 = área de recepción; S = tamaño de la microcuenca (o unidad sistematizada); S_3 = área de los pasillos laterales de escorrentía; S_p = superficie puesta a disposición de cada planta (= $S_1 + S_2 + S_3$)

Un caso extremo interesante, que se puede analizar por separado, es el de las pocetas o alcorques aislados, sin área de impluvio que los alimente. En tal situación, no recibirán escorrentía (E_{s1} = 0 mm, pues S_1 = 0 m^2 y $S_3 = S_p - S_2$).

El método del número de curva aplicado al microembalse aislado tiene por expresión:

$$E_{s2} = \frac{(P - PR)^2}{P + 4 \cdot PR} \qquad \text{con} \qquad PR = 0{,}2 \cdot \frac{25.400 - 254 \cdot NR}{NR}$$

Si incluimos el tamaño del área de recepción (del hoyo, S_2) en la ecuación anterior:

$$E_{s2} \cdot S_2 = \frac{(P - PR)^2}{P + 4 \cdot PR} \cdot S_2$$

La lluvia neta queda retenida en el alcorque gracias a *CAPA* hasta que el microembalse se colmata y empieza a rebosar. Al imponer que la lluvia neta ($E_{s2} \cdot S_2$) coincida con la capacidad de la trampa de agua (*CAPA*), se determina la precipitación límite para la poceta aislada.

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

Despejando P de esta última ecuación, se obtiene la precipitación umbral (*PUM*):

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

La precipitación umbral es la precipitación límite de un alcorque aislado (= precipitación límite de alcorques contiguos sin área de impluvio): $PUM = P2$.

A esta precipitación umbral (*PUM*) le corresponde un número de curva (*NAL*), a saber:

$$NAL = \frac{5.080}{PUM + 50{,}8} \quad (= NEQ)$$

siendo *NAL* el número de curva equivalente de un microembalse sin área de impluvio (número de curva de un alcorque aislado: $S_1 = 0$ m^2; $E_{s1} = 0$ mm).

Las tres ecuaciones vistas para una sistematización primaria parcial valen para este caso extremo de alcorques completamente aislados. Basta con sustituir en ellas la particularidad contemplada en este caso: $S_1 = 0$ y $S_3 = S_p - S_2$

$$P3 = 0{,}2 \cdot \frac{25.400 - 254 \cdot N3}{N3} = \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot N3}{N3}$$

$$PAS = P - T \cdot \frac{(P - P3)^2}{P + 4 \cdot P3} \quad \text{con } T = 0 \text{ si } P \le P3 \text{ y } T = 1 \text{ si } P > P3$$

$$PROM3 = \frac{PIMP \cdot 0 + DESP \cdot S_2 + PAS \cdot S_3}{S_p} = \frac{DESP \cdot S_2 + PAS \cdot (S_p - S_2)}{S_p}$$

A estas tres ecuaciones anteriores hay que agregar la expresión que calcula la disponibilidad hídrica en el alcorque (*DESP*), para tener el problema plenamente resuelto:

$$DESP = P - TT \cdot \frac{(P - PUM)^2}{P + 4 \cdot PUM}$$

$$\text{con } TT = 0 \text{ si } P \le PUM \text{ y } TT = 1 \text{ si } P > PUM$$

Nota: En todo este último desarrollo subyace una hipótesis de cálculo muy pesimista que no suele darse en la realidad: se admite que no hay área de impluvio (S_1 = 0 m^2), que las pocetas no se benefician en nada de la escorrentía que se genera a su alrededor (microembalses desconectados de su entorno, algo que no se logra ni a propósito): No hay guías de escorrentía hacia los alcorques sino todo lo contrario: muretes que impiden la entrada del agua a los mismos. Ello da lugar a una estimación de las disponibilidades hídricas de la ladera por defecto. Aún en el caso de que se realicen hoyos 'aislados', alguna conexión con el entorno han de tener.

****

Con estas bases y fórmulas estamos ya en condiciones de analizar un supuesto de repoblación por hoyos contemplando diferentes posibilidades que van desde alcorques aislados hasta sistematizaciones primarias plenas, pasando por sistematizaciones incompletas. Los datos de la preparación del suelo son los siguientes: Hoyos grandes de 0,5·0,5·0,4 m^3 ($a \cdot b \cdot p$; ancho · largo · profundidad de suelo removida); marco de plantación cuadrado con L = 3,5 m y D = 3,5 m (D = equidistancia entre hoyos de una misma línea (de máxima pendiente); L = distancia entre líneas contiguas de hoyos).

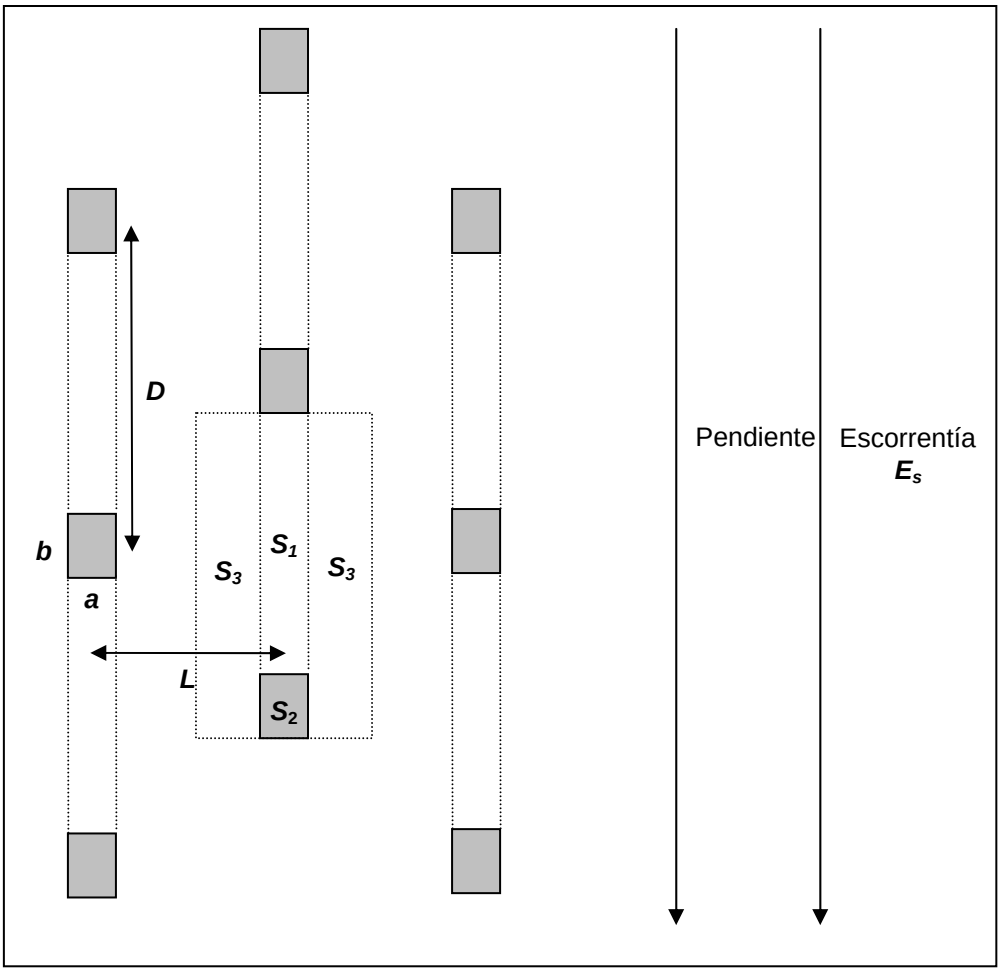


Figura 51: Representación esquemática de una sistematización incompleta consistente en ahoyado con alcorques

1) Halle la densidad de repoblación.
2) Estime el tamaño del área de impluvio, del área de recepción, y de los pasillos de escorrentía en una sistematización primaria incompleta (sin caballones guía, y con unos caballones guía parciales de 0,5 m de anchura)
3) Calcule los mismos datos para la sistematización primaria plena.
4) Estime el tamaño de trampa de agua necesario para lograr endorreísmo en los tres casos planteados para un aguacero de 30 mm (y condiciones antecedentes de humedad medias, $J = 2$), si se trabaja con un coeficiente de escorrentía de 0,5.
5) Al hoyo se le dota con un alcorque de 75 litros de capacidad, perfilando unos muretes de unos 30 cm de altura en su alrededor ($CAPA \approx S_2 \cdot H = 0{,}25 \cdot 0{,}3 = 0{,}075$ m^3). Halle la precipitación límite para los tres casos anteriores en el supuesto de un terreno totalmente impermeable ($C = 1$; $N = 100$).

R1: $S_p = L \cdot D = 3{,}5 \cdot 3{,}5 = 12{,}25$ m^2 (superficie para cada planta)

$$S_p = {}^{10.000}\!/_{n} \Rightarrow n = {}^{10.000}\!/_{S_p} = {}^{10.000}\!/_{12{,}25} = 816 \text{ pies/ha}$$

Se realizan 816 hoyos en una hectárea.

R2: Sin caballones guía:

$S_1 = a \cdot (D - b) = 0{,}5 \cdot (3{,}5 - 0{,}5) = 1{,}5$ m^2 (área de impluvio)
$S_2 = a \cdot b = 0{,}5 \cdot 0{,}5 = 0{,}25$ m^2 (área de recepción)
$S_3 = (L - a) \cdot D = (3{,}5 - 0{,}5) \cdot 3{,}5 = 10{,}5$ m^2 (pasillos de escorrentía)
$R = {}^{S_1}\!/_{S_2} = 6$ (relación entre el área de impluvio y el área de recepción)

Con caballones guía parciales de $x = 0{,}5$ m de anchura:

$S_1 = a \cdot (D - b) + 2 \cdot x \cdot D = 0{,}5 \cdot (3{,}5 - 0{,}5) + 2 \cdot 0{,}5 \cdot 3{,}5 = 5$ m^2 (área de impluvio)
$S_2 = a \cdot b = 0{,}5 \cdot 0{,}5 = 0{,}25$ m^2 (área de recepción)
$S_3 = (L - a) \cdot D - 2 \cdot x \cdot D = (3{,}5 - 0{,}5) \cdot 3{,}5 - 2 \cdot 0{,}5 \cdot 3{,}5 = 7$ m^2 (pasillos de escorrentía)
$R = {}^{S_1}\!/_{S_2} = 20$ (relación entre el área de impluvio y el área de recepción)

R3: Sistematización primaria completa ($x = \dfrac{L - a}{2} = 1{,}5$ m):

$S_1 = S_p - S_2 = 12{,}25 - 0{,}25 = 12$ m^2 (área de impluvio)
También: $S_1 = a \cdot (D - b) + 2 \cdot x \cdot D = 0{,}5 \cdot (3{,}5 - 0{,}5) + 2 \cdot 1{,}5 \cdot 3{,}5 = 12$ m^2
$S_2 = a \cdot b = 0{,}5 \cdot 0{,}5 = 0{,}25$ m^2 (área de recepción)
$S_3 = 0$ m^2 (pasillos de escorrentía)

$R = S_1 / S_2 = 48$ (relación entre el área de impluvio y el área de recepción)

R4: La ecuación que resuelve es: $CAPA \geq E_s \cdot (S_1 + S_2)$

Por definición de coeficiente de escorrentía: $C = \frac{E_s}{P}$. Luego: $E_s = C \cdot P$

Queda una escorrentía superficial de 15 l/m^2 ($E_s = 0{,}5 \cdot 30$ mm). Como conocemos el tamaño de la unidad sistematizada ($S_1 + S_2$) en los tres casos, de apartados anteriores, podemos estimar *CAPA*. Los resultados figuran en la tabla adjunta:

Caso	Sin caballones x = 0 m	Caballones parciales x = 0,5 m	Sistematización plena x = 1,5 m
$S_1 + S_2$	1,75 m^2	5,25 m^2	12,25 m^2
CAPA	26,25 litros	78,75 litros	183,75 litros

R5: La precipitación límite (*P2*) en terrenos impermeables (N = 100; ó C = 1) se obtiene de la expresión:

$$P2 = \frac{CAPA}{S_1 + S_2}$$

Los resultados de aplicar esta fórmula se ofrecen en la tabla siguiente:

Caso	Alcorques aislados	x = 0 m	x = 0,5 m	x = 1,5 m
$S_1 + S_2$	0,25 m^2	1,75 m^2	5,25 m^2	12,25 m^2
P2	300 mm	42,8 mm	14,2 mm	6,1 mm

****

Las laderas en donde se realiza el ahoyado descrito están muy degradadas. El número de curva actual (antes de la intervención) vale 89 (*NAC* = 89, pastizal pobre en suelo de tipo D). Los números de curva del área de impluvio y de los pasillos de escorrentía coinciden con el de la ladera actual ($NI = N3 = NAC = 89$). El número de curva en los hoyos se estima en *NR* = 93 (barbecho con residuos y condición hidrológica pobre, suelo de tipo D[6]).

6) Con ayuda del programa MODIPÉ, obtenga la precipitación límite para los cuatro casos considerados.
7) ¿Qué disponibilidad hídrica procurará un aguacero primaveral, previo a la llegada del estío, de 20 mm, en el área de recepción, si la ladera está en condiciones medias de humedad? Contemple los cuatro casos que llevamos arrastrando.
8) Para evitar marras por estrés hídrico se desea una disponibilidad hídrica anual de 800 mm para los brinzales trasplantados. A continuación se ofrecen los datos sobre precipitaciones del año medio de las series disponibles en tres estaciones meteorológicas diferentes: Almazán (Soria, España); Geria (Valladolid, España) y Albox (Almería, España). Manteniendo la densidad de plantación y el tamaño de trampa de agua (S_p = 12,25 m^2; *CAPA* = 75 litros), decida para cada estación la

[6] Nota: Por la profundidad de suelo excavada al realizar el hoyo (p = 0,4 m) también pudiera trabajarse con *NR* = 90, correspondiente a un suelo de tipo C.

sistematización más conveniente con el fin de lograr (o superar) la disponibilidad hídrica objetivo de 800 mm.

Tabla 14: Datos meteorológicos del año medio (1987) de la serie disponible en Almazán (P_m, precipitación mensual; $P_{máx}$, precipitación máxima diaria del mes; *na*, número de días con precipitación apreciable en el mes)

MES	P_m (mm)	$P_{máx}$ (mm)	*na*
Enero	50,8	17,0	11
Febrero	45,5	10,0	12
Marzo	18,6	9,5	6
Abril	42,9	15,6	7
Mayo	45,2	15,5	8
Junio	18,3	8,0	6
Julio	86,1	23,0	13
Agosto	15,1	14,8	2
Septiembre	28,1	22,0	5
Octubre	126,4	66,6	18
Noviembre	26,1	17,5	7
Diciembre	63,7	12,7	12
Σ (suma)	566,8	----	107

Tabla 15: Datos meteorológicos del año medio (1965) de la serie disponible en Geria

MES	P_m (mm)	$P_{máx}$ (mm)	*na*
Enero	37,6	10,0	9
Febrero	45,6	15,4	8
Marzo	79,8	17,0	13
Abril	0,8	0,8	1
Mayo	8,5	8,5	1
Junio	27,9	14,5	3
Julio	0,0	0,0	0
Agosto	0,0	0,0	0
Septiembre	79,9	40,1	4
Octubre	60,1	21,0	10
Noviembre	66,2	12,6	17
Diciembre	40,7	9,4	13
Σ (suma)	447,1	----	79

Tabla 16: Datos meteorológicos del año medio (1986) de la serie disponible en Albox

MES	P_m (mm)	$P_{máx}$ (mm)	*na*
Enero	2,6	2,5	2
Febrero	0,2	0,2	1
Marzo	50,0	22,0	6
Abril	5,3	4,2	4
Mayo	28,5	24,5	3
Junio	14,0	13,0	2
Julio	21,7	17,0	2
Agosto	0,7	0,5	2
Septiembre	19,4	11,0	4
Octubre	131,9	45,0	10
Noviembre	15,8	5,0	6
Diciembre	0,5	0,5	1
Σ (suma)	290,6	----	43

R6: El modelo MODIPÉ distingue entre tres situaciones de humedad previas al aguacero (J = 1, suelo seco / J = 2, condiciones medias / y J = 3, suelo húmedo) a la hora de determinar la precipitación límite ($P2$). Los resultados obtenidos con el programa figuran en la tabla siguiente:

Caso	Alcorques aislados	x = 0 m (sist. parcial)	x = 0,5 m (sist. parcial)	x = 1,5 m (sist. completa)
$P2$ (J = 1)	349,2 mm	94,2 mm	54,8 mm	39,3 mm
$P2$ (J = 2)	321,8 mm	68,8 mm	35,4 mm	23,4 mm
$P2$ (J = 3)	309,8 mm	55,8 mm	25,4 mm	15,4 mm

R7: Si se produce un chubasco de 20 l/m^2 bajo condiciones medias de humedad antecedente (J = 2), la cantidad de agua que se infiltrará en los hoyos, según el caso, se indica en la tabla adjunta:

Caso	Alcorques aislados	x = 0 m (sist. parcial)	x = 0,5 m (sist. parcial)	x = 1,5 m (sist. completa)
S_1	0,0 m^2	1,5 m^2	5,0 m^2	12,0 m^2
DESP	20,0 mm	45,0 mm	103,5 mm (♦)	220,3 mm (♦)
Valores muy elevados de disponibilidad hídrica (♦) conviene truncarlos, limitándolos a la capacidad de retención de agua que tenga el suelo del hoyo.				

R8: Puesto que la disponibilidad hídrica objetivo (800 mm) es superior a la precipitación anual, en los tres casos se precisa de un área de impluvio para recolectar el agua que falta: 233,2 mm en Almazán; 352,9 mm en Geria y 509,4 mm en Albox. Se comprende que las áreas de impluvio requeridas en los tres lugares sean diferentes, siendo la mayor en la estación más árida.

En Almazán es suficiente con una sistematización primaria incompleta en la que x = 0 m (tabla 17). En Geria se consigue una disponibilidad superior a 800 mm con x = 0,5 m (tabla 18). En Albox, por el contrario, se aconseja una sistematización primaria completa (tabla 19), si se quieren alcanzar y superar los 800 mm de disponibilidad hídrica.

Tabla 17: Disponibilidades hídricas mensuales (en mm) para el año medio de referencia (1987) en los hoyos de la ladera considerada en Almazán con S_1 = 1,5 m^2 (x = 0 m); S_2 = 0,25 m^2; *NI* = 89; *NR*= 93 y *CAPA* = 75 litros

MES	LLANO (P_m)	LADERA DEGRADADA	DISPONIBILIDAD EN LOS HOYOS
Enero	50,8	50,7	51,1
Febrero	45,5	45,5	45,5
Marzo	18,6	18,6	18,6
Abril	42,9	42,9	42,9
Mayo	45,2	45,2	45,2
Junio	18,3	18,3	18,3
Julio	86,1	85,3	90,8
Agosto	15,1	15,1	15,1
Septiembre	28,1	27,5	31,7
Octubre	126,4	53,0	493,4 (100) ♦
Noviembre	26,1	26,0	26,6
Diciembre	63,7	61,9	74,3
AÑO	566,8	490,1	**953,6** (> 800) **560,2**
Nota: Valores mensuales muy elevados de disponibilidad hídrica (♦) conviene truncarlos, limitándolos a la capacidad de retención de agua que tenga el suelo del hoyo o a la evapotranspiración mensual, el valor mayor de ambos (100 mm en el ejemplo).			

Tabla 18: Disponibilidades hídricas mensuales (en mm) para el año medio de referencia (1965) en los hoyos de la ladera considerada en Geria con S_1 = 5,0 m^2 (x = 0,5 m); S_2 = 0,25 m^2; *NI* = 89; *NR*= 93 y *CAPA* = 75 litros

MES	LLANO (P_m)	LADERA DEGRADADA	DISPONIBILIDAD EN LOS HOYOS
Enero	37,6	37,6	37,6
Febrero	45,6	45,6	45,7
Marzo	79,8	74,7	182,1 (100) ♦
Abril	0,8	0,8	0,8
Mayo	8,5	8,5	8,5
Junio	27,9	27,9	27,9
Julio	0,0	0,0	0,0
Agosto	0,0	0,0	0,0
Septiembre	79,9	72,0	238,1 (100) ♦
Octubre	60,1	53,4	194,4 (100) ♦
Noviembre	66,2	66,2	66,2
Diciembre	40,7	40,7	40,7
AÑO	447,1	427,4	**842,0** (> 800) **527,4**
Nota: Valores mensuales muy elevados de disponibilidad hídrica (♦) conviene truncarlos, limitándolos a la capacidad de retención de agua que tenga el suelo del hoyo o a la evapotranspiración mensual, el valor mayor de ambos (100 mm en el ejemplo).			

Tabla 19: Disponibilidades hídricas mensuales (en mm) para el año medio de referencia (1986) en los hoyos de la ladera considerada en Albox con S_1 = 12,0 m^2 (sistematización completa); S_2 = 0,25 m^2; *NI* = 89; *NR*= 93 y *CAPA* = 75 litros

MES	LLANO (P_m)	LADERA DEGRADADA	DISPONIBILIDAD EN LOS HOYOS
Enero	2,6	2,6	2,6
Febrero	0,2	0,2	0,2
Marzo	50,0	42,9	390,6 (100) ♦
Abril	5,3	5,3	5,3
Mayo	28,5	27,4	80,4
Junio	14,0	14,0	14,0
Julio	21,7	21,6	24,3
Agosto	0,7	0,7	0,7
Septiembre	19,4	19,4	19,4
Octubre	131,9	61,2	1.332,9 (100) ♦
Noviembre	15,8	15,8	15,8
Diciembre	0,5	0,5	0,5
AÑO	290,6	211,6	**1.886,8** (> 800) **363,2**
Nota: Valores mensuales muy elevados de disponibilidad hídrica (♦) conviene truncarlos, limitándolos a la capacidad de retención de agua que tenga el suelo del hoyo o a la evapotranspiración mensual, el valor mayor de ambos (100 mm en el ejemplo).			

Notas:

- Resulta mucho más conveniente adoptar esta decisión (referente a si perfilar una sistematización primaria incompleta o plena) analizando todos los años disponibles de la estación (en vez de uno sólo, como hemos hecho aquí) y determinando el valor de la variable x para cada año estudiado. El hecho de que x resulte mayor de 1,5 m (↔ sistematización completa) en muchos de los años de estudio estará indicando que

conviene trabajar con un marco de plantación más espaciado, es decir: con una densidad de repoblación menor ($n < 816$ plantas/ha).

- Lo ideal es trabajar con todos los aguaceros acaecidos en la zona de estudio (mes a mes), en vez de trabajar con ternas mensuales, que resumen la información de las lluvias pero que obligan a acudir al método de los aguaceros virtuales (lo cual genera una fuerte horquilla de escorrentías posibles). En el ejercicio se ha trabajado con el caso III, de escorrentía intermedia.

Formulario

Formulario

*** Método del número de curva**

$$E_s = \frac{(P - P_0)^2}{P - P_0 + S}$$

E_s = escorrentía superficial; P = precipitación del chubasco; P_0 = umbral de escorrentía; S = retención máxima posible (todas las magnitudes en mm)

Si se admite que $P_0 = 0{,}2 \cdot S$ se llega al modelo uniparamétrico habitual:

$$E_s = \frac{(P - P_0)^2}{P + 4 \cdot P_0} \qquad \text{si } P > P_0$$

P_0 se calcula a través del número de curva (N), mediante la expresión:

$$P_0 = 0{,}2 \cdot \frac{25.400 - 254 \cdot N}{N} = \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot N}{N} \qquad \text{(mm)}$$

El número de curva (adimensional) se estima manejando las tablas de los apéndices 1 y 2, que se refieren a una situación intermedia en la humedad antecedente del suelo (J = 2).

El método del número de curva ha sido calibrado (ajustado) en cuencas de varios kilómetros cuadrados. Los números de curva a la escala de microcuencas (m^2) resultan algo más altos que los indicados en las tablas, pues N aumenta al disminuir el tamaño de la superficie de escurrimiento. Este hecho puede tenerse en cuenta al utilizar las mencionadas tablas para fijar *NI* y *NR*. A nivel práctico, al aplicar el método del número de curva a microcuencas conviene trabajar con los N mayores dentro de la descripción de las tablas que mejor se ajuste al lugar considerado.

*** Cambio de números de curva** (según sea la situación de humedad del suelo previa al aguacero)

J = 2 (situación intermedia): Son los números de curva facilitados en las tablas de los apéndices 1 y 2: *N(2)*.
J = 1 (suelo seco): *N(1)* se calcula a partir de *N(2)*.
J = 3 (suelo húmedo): *N(3)* se calcula a partir de *N(2)*.

$$N(1) = \frac{4{,}2 \cdot N(2)}{10 - 0{,}058 \cdot N(2)}$$

$$N(3) = \frac{23 \cdot N(2)}{10 + 0{,}13 \cdot N(2)}$$

N(J) = número de curva (adimensional) en condición J de humedad antecedente

*** Coeficiente de escorrentía**

$$C = \frac{E_s}{P} \qquad \text{con} \quad 0 \le C \le 1$$

C = coeficiente de escorrentía (adimensional); E_s = escorrentía superficial (en mm); P = precipitación del chubasco (en mm)

El coeficiente de escorrentía de un complejo hidrológico puede calcularse a partir de su número de curva (N) y del aguacero (P):

$$C = \frac{(P - P_0)^2}{P^2 + 4 \cdot P \cdot P_0} = \frac{\left(P - \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot N}{N}\right)^2}{P^2 + P \cdot \frac{20.320 - 203{,}2 \cdot N}{N}}$$

*** Ecuaciones generales sobre recolección de agua** (captación de aguas de lluvia y escorrentía superficial)

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

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

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

P = precipitación del aguacero analizado (mm); $DESP$ = infiltración o disponibilidad hídrica del área de recepción (mm); $PIMP$ = disponibilidad hídrica del área de impluvio (mm); $PROM$ = disponibilidad hídrica media en la unidad sistematizada (≈ en la ladera, si se trata de sistematizaciones plenas) (mm); E_{s1} = lluvia neta o escorrentía superficial que se produce en el área de impluvio (mm); E_{s2} = escorrentía superficial que escapa de la unidad sistematizada (mm); S_1 = superficie correspondiente al área de impluvio (m^2); S_2 = superficie del área de recepción (m^2); S = tamaño de la unidad sistematizada ($S = S_1 + S_2$)

*** Condición general de endorreísmo**

$$CAPA \geq E_{s1} \cdot S_1 + (P_c - I) \cdot S_2$$

$CAPA$ = tamaño del microembalse (litros); E_{s1} = escorrentía superficial que se produce en el área de impluvio (mm); S_1 = superficie del área de impluvio (m^2); P_c = precipitación de cálculo (frente a la que el sistema de recolección de agua debe ser endorreico) (mm); I = volumen de agua infiltrado en el área de recepción durante la precipitación de cálculo; S_2 = superficie del área de recepción (m^2)

*** Condiciones de endorreísmo**

Las cuatro condiciones equivalentes de endorreísmo para una unidad sistematizada son:

$$E_{s2} = 0 \text{ mm} \Leftrightarrow PROM = \frac{PIMP \cdot S_1 + DESP \cdot S_2}{S_1 + S_2} = P \Leftrightarrow P \leq P2 \Leftrightarrow CAPA \geq CAPAL$$

E_{s2} = escorrentía superficial que escapa de la unidad sistematizada (mm); $PROM$ = disponibilidad hídrica media en la unidad sistematizada (mm); P = precipitación del chubasco (mm); $P2$ = precipitación límite (mm) [que se concreta más adelante en este mismo formulario]; $CAPA$ = capacidad del microembalse (litros); $CAPAL$ = capacidad mínima del alcorque para retener toda la escorrentía que se produce en la unidad sistematizada (litros) [también se concreta más adelante]

*** Umbrales de escorrentía** (modelo MODIPÉ)

♦ El modelo del número de curva, en su versión uniparamétrica habitual, trabaja con la siguiente relación fundamental:

$$P_0 = \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot N}{N}$$

siendo P_0 = umbral de escorrentía (en mm); N = número de curva (adimensional)

♦ El modelo MODIPÉ distingue cinco (seis) diferentes umbrales de escorrentía dentro de la preparación del suelo a estudiar: *PAC*, *P1*, *PR*, *P0*, *P2* (y *P3*).

PAC = umbral de escorrentía de la ladera degradada (antes de la intervención); *P1* = umbral de escorrentía del área de impluvio; *PR* = umbral de escorrentía del área de recepción; *P0* = umbral de escorrentía medio de la unidad sistematizada, sin considerar el efecto alcorque; *P2* = precipitación límite = umbral de escorrentía de la unidad sistematizada considerando el efecto del alcorque; *P3* = umbral de escorrentía de los pasillos de escorrentía (en sistematizaciones primarias parciales) (todos los umbrales en mm o l/m^2)

♦ *PAC*, *P1*, *PR* y *P3* se calculan haciendo uso de la fórmula fundamental anterior, trabajando con el número de curva correspondiente a cada caso: *NAC* para *PAC*, *NI* para *P1*, *NR* para *PR* y *N3* para *P3*.

NAC = número de curva de la ladera degradada actual, antes de la intervención; *NI* = número de curva del área de impluvio; *NR* = número de curva del área de recepción; *N3* = número de curva en los pasillos de escorrentía (Los números de curva son adimensionales.)

♦ Para calcular *P0* hay que hallar el número de curva promedio (*NM*), ponderado según superficies, de la unidad sistematizada:

$$NM = \frac{NI \cdot S_1 + NR \cdot S_2}{S_1 + S_2} \qquad \text{(número de curva promedio)}$$

$$P0 = \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot NM}{NM} \qquad \text{(en mm)}$$

S_1 = área de impluvio (m^2); S_2 = área de recepción (m^2)

♦ El umbral de escorrentía de la unidad sistematizada o precipitación límite (*P2*) es más complejo de calcular. Se aborda más adelante, en un apartado específico.

*** Capacidad de embalse del área de recepción**

♦ El tamaño del microembalse (*CAPA*) debe ser estimado con precisión pues los sistemas de recolección de agua son muy sensibles a esta variable, que resulta crucial en todo proceso de restauración vegetal de zona árida (oasificación).

♦ $CAPA \approx S_2 \cdot H$ (en litros)

siendo H la profundidad de la poceta o la altura de las represas que delimitan el área de recepción (S_2, en m^2); (H en mm)

♦ En preparaciones del terreno lineales (según curvas de nivel) se suele trabajar en los cálculos por unidad de longitud (1 m ≡ 1.000 mm), de manera que:

$CAPA = 1.000 \cdot A$ (en litros)

siendo A la sección mojada máxima (a resguardo nulo) de los caballones, de las zanjas de infiltración, de las terrazas de absorción, etc. (en m^2).

*** 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**

$CAPMIN = 0$ si $NI \geq NR$

$CAPMIN = máx\left(CAPMIN(1), CAPMIN(2), CAPMIN(3)\right)$ si $NI < NR$

con $CAPMIN(J) = \dfrac{\left(P1(J) - PR(J)\right)^2}{P1(J) + 4 \cdot PR(J)}$

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 (en litros); J = condición antecedente de humedad (1, 2 ó 3); $P1(J)$ = umbral de escorrentía del área de impluvio para una condición antecedente de humedad J (en mm); $PR(J)$ = umbral de escorrentía del área de recepción para una condición antecedente de humedad J (en mm).

En el diseño de todo sistema de recolección de agua, la capacidad a dar al microembalse debe ser mayor que *CAPMIN* (si $NI < NR$): $CAPA > CAPMIN$.

*** Disponibilidad hídrica en la ladera antes de la intervención** (modelo MODIPÉ)

$$ANTES = P - M \cdot \frac{(P - PAC)^2}{P + 4 \cdot PAC}$$

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

ANTES = cantidad de agua que se infiltra en la ladera degradada antes de la sistematización (en l/m^2); *P* = precipitación del chubasco (en mm); *PAC* = umbral de escorrentía de la ladera degradada (en mm); *NAC* = número de curva de la ladera actual; *M* = constante que vale cero si la precipitación es inferior al umbral (*PAC*) y uno en el caso contrario.

*** Disponibilidad hídrica en el área de impluvio** (modelo MODIPÉ)

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

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

PIMP = disponibilidad hídrica en el área de impluvio (mm); *P* = precipitación del aguacero (mm); *P1* = umbral de escorrentía del área de impluvio (mm); *NI* = número de curva del área de impluvio (adimensional); *L* = constante que vale cero si la precipitación es menor que el umbral de escorrentía (*P1*) y uno en caso contrario

*** Disponibilidad hídrica en el área de recepción** (modelo MODIPÉ)

$$DESP = P + E_{s1} - E_{s2} = P + L \cdot \frac{(P - P1)^2}{P + 4 \cdot P1} \cdot \frac{S_1}{S_2} - E_{s2}$$

$$E_{s2} = 0 \quad si \quad MAX \leq CAPA \; ; \quad E_{s2} = \frac{MAX - CAPA}{S_2} \quad si \quad MAX > CAPA$$

MAX se calcula según el caso, dependiendo de los valores relativos del número de curva en el área de impluvio (*NI*) y en el área de recepción (*NR*):

$$MAX = K \cdot \frac{(P - P0)^2}{P + 4 \cdot P0} \cdot (S_1 + S_2) \quad \text{si } NI \geq NR$$

$$MAX = LL \cdot \frac{(P - PR)^2}{P + 4 \cdot PR} \cdot S_2 + L \cdot \frac{(P - P1)^2}{P + 4 \cdot P1} \cdot S_1 \quad \text{si } NI < NR$$

DESP = disponibilidad hídrica en el área de recepción (mm); S_1 = superficie del área de impluvio (en m^2); S_2 = superficie del área de recepción (en m^2); *MAX* = escorrentía máxima que puede escapar de la sistematización para alcorque nulo (en litros); *CAPA* = capacidad del microembalse (en litros); *P0* = umbral de escorrentía medio de la unidad sistematizada sin considerar el efecto alcorque (en mm); *P1* = umbral de escorrentía del área de impluvio (en mm); *PR* = umbral de escorrentía del área de recepción (en mm); *NI* = número de curva del área de impluvio; *NR* = número de curva del área de recepción; *K* = constante que vale uno (o cero) según que la precipitación rebase (o no) el umbral de escorrentía promedio de la unidad (*P0*); *L* = constante que vale cero si la precipitación es menor que el umbral de escorrentía del área de impluvio (*P1*) y uno en caso contrario; *LL* = constante que vale uno (o cero) según se supere (o no) el umbral de escorrentía del área de recepción (*PR*).

Notas:

$$P0 = 0{,}2 \cdot \frac{25.400 - 254 \cdot NM}{NM} \quad \text{(en mm)}$$

$$NM = \frac{NI \cdot S_1 + NR \cdot S_2}{S_1 + S_2} \quad \text{(número de curva promedio)}$$

Consulte el apéndice 4 para profundizar en la comprensión de las ecuaciones principales del modelo MODIPÉ.

*** Precipitación límite** (modelo MODIPÉ)

Para calcular la precipitación límite de la unidad sistematizada (*P2*) hay que imponer:

$$MAX = CAPA$$

Esta igualdad es un polinomio de segundo o de tercer grado en *P*, cuya raíz lógica se corresponde con la precipitación límite ($P = P2$). Una vez conocida esta precipitación límite, la obtención del número de curva equivalente de la unidad sistematizada (*NEQ*) es inmediata:

$$NEQ = \frac{5.080}{P2 + 50{,}8}$$

P2 = umbral de escorrentía de la unidad sistematizada (= precipitación límite) (mm); *MAX* = escorrentía máxima que puede escapar de la sistematización para alcorque nulo (en litros); *CAPA* = capacidad del microembalse (en litros); *NEQ* = número de curva equivalente de la unidad sistematizada considerando el efecto del microembalse (adimensional).

Los polinomios (en *P* = *P2*) que resuelven son:

- $P^2 - \frac{2 \cdot P0 \cdot (S_1 + S_2) + CAPA}{S_1 + S_2} \cdot P - \frac{4 \cdot CAPA \cdot P0}{S_1 + S_2} + P0^2 = 0$ (si $NI \geq NR$)

- $P^2 - \frac{2 \cdot PR \cdot S_2 + CAPA}{S_2} \cdot P - \frac{4 \cdot CAPA \cdot PR}{S_2} + PR^2 = 0$ (si $NI < NR$ y $CAPA \leq CAPMIN$)

- $FAC1 \cdot P^3 + FAC2 \cdot P^2 + FAC3 \cdot P + FAC4 = 0$ (si $NI < NR$ y $CAPA > CAPMIN$)

$$FAC1 = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} \qquad FAC2 = \frac{4 \cdot P1 - 2 \cdot PR}{S_1} + \frac{4 \cdot PR - 2 \cdot P1}{S_2} - \frac{CAPA}{S_1 \cdot S_2}$$

$$FAC3 = \frac{PR^2 - 8 \cdot PR \cdot P1}{S_1} + \frac{P1^2 - 8 \cdot P1 \cdot PR}{S_2} - \frac{4 \cdot (P1 + PR) \cdot CAPA}{S_1 \cdot S_2}$$

$$FAC4 = \frac{4 \cdot P1 \cdot PR^2}{S_1} + \frac{4 \cdot PR \cdot P1^2}{S_2} - \frac{16 \cdot P1 \cdot PR \cdot CAPA}{S_1 \cdot S_2}$$

Nota:

$$P1 = 0{,}2 \cdot \frac{25.400 - 254 \cdot NI}{NI}$$ (umbral de escorrentía del área de impluvio) (mm)

$$PR = 0{,}2 \cdot \frac{25.400 - 254 \cdot NR}{NR}$$ (umbral de escorrentía del área de recepción) (mm)

*** Precipitación límite de un alcorque aislado** (modelo MODIPÉ)

$$P2 = PR + \frac{CAPA}{2 \cdot S_2} + \sqrt{\left[PR + \frac{CAPA}{2 \cdot S_2}\right]^2 + \frac{4 \cdot CAPA \cdot PR}{S_2} - PR^2}$$

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

P2 = precipitación límite (mm); *PR* = umbral de escorrentía en el terreno del alcorque aislado (mm); *NR* = número de curva en el alcorque (adimensional); *CAPA* = capacidad del alcorque (litros); S_2 = superficie del alcorque (o área de 'recepción') (m^2)

*** Precipitación límite** (modelo MAUCO GENERALIZADO)

$$P2 = \frac{CAPA}{CI \cdot S_1 + CR \cdot S_2}$$

P2 = precipitación límite (mm); *CAPA* = capacidad del microembalse (litros); S_1 = superficie del área de impluvio (en m^2); S_2 = superficie del área de recepción (en m^2); *CI* = coeficiente de escorrentía en el área de impluvio (adimensional); *CR* = coeficiente de escorrentía en el área de recepción (adimensional)

* Precipitación límite en terrenos impermeables: $P2 = \frac{CAPA}{S_1 + S_2}$, pues $CI = CR = 1$

*** Capacidad mínima del alcorque para retener toda la lluvia neta que se produce en la unidad sistematizada**

$$CAPAL = MAX$$

siendo *CAPAL* la capacidad mínima del alcorque para retener toda la escorrentía que se produce en la unidad sistematizada (en litros) y *MAX* la escorrentía máxima que puede escapar de la unidad sistematizada para alcorque nulo (en litros)
Las dos expresiones de *MAX* pueden consultarse en el epígrafe que trata sobre la disponibilidad hídrica en el área de recepción.

*** Precipitaciones de cálculo** (en sistemas de recolección de agua)

♦ Para fijar el tamaño de la trampa de agua (*CAPA*) la precipitación de cálculo debe entenderse como un aguacero intenso, con un determinado periodo de retorno relacionado con la instalación y el crecimiento de la vegetación.

♦ Para fijar la relación entre el área de impluvio y el área de recepción ($R = S_1 / S_2$) hay que trabajar con una serie representativa de aguaceros (que sean habituales en la comarca, en primavera o en la temporada final de lluvias) o con los chubascos del año medio característico del lugar. Estas lluvias deben aportar al área de recepción una cantidad de agua adecuada, con la que se alcance la disponibilidad hídrica objetivo.

*** Sistematización primaria incompleta**

♦ La superficie puesta a disposición de cada planta (S_p) se desglosa en tres áreas parciales: área de impluvio (S_1), área de recepción (S_2) y pasillos de escorrentía (S_3).

$$S_p = S_1 + S_2 + S_3 \qquad \text{y} \qquad S = S_1 + S_2 < S_p$$

♦ Hay que considerar unos pasillos de escorrentía, de superficie S_3 con un número de curva *N3*.

♦ Las tres ecuaciones adicionales que resuelven una sistematización primaria parcial son:

$$P3 = 0{,}2 \cdot \frac{25.400 - 254 \cdot N3}{N3} = \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot N3}{N3}$$

$$PAS = P - T \cdot \frac{(P - P3)^2}{P + 4 \cdot P3} \quad \text{con } T = 0 \text{ si } P \le P3 \text{ y } T = 1 \text{ si } P > P3$$

$$PROM3 = \frac{PROM \cdot (S_1 + S_2) + PAS \cdot S_3}{S_1 + S_2 + S_3} = \frac{PIMP \cdot S_1 + DESP \cdot S_2 + PAS \cdot S_3}{S_p}$$

siendo: *P3* = umbral de escorrentía en los pasillos; *N3* = número de curva en los pasillos; PAS = disponibilidad hídrica en los pasillos de escorrentía; *T* = constante que vale uno o cero (según el caso); *PROM3* = disponibilidad hídrica promedio en la sistematización primaria incompleta (≈ en la ladera); *PROM* = disponibilidad hídrica promedio en la unidad sistematizada; S_1 = área de impluvio; S_2 = área de recepción; *S* = tamaño de la microcuenca (o unidad sistematizada); S_3 = área de los pasillos laterales de escorrentía; S_p = superficie puesta a disposición de cada planta (= $S_1 + S_2 + S_3 = 10.000 / n$); *n* = número de pies plantados en una hectárea [áreas en m^2, umbrales y disponibilidades hídricas en mm, números de curva adimensionales]

Consulte la cuestión 11, el ejemplo 8 y el apéndice 4, si desea profundizar en la temática de las sistematizaciones primarias parciales.

*** Sistemas de recolección de agua desde cauces efímeros**

En los sistemas de recolección de agua en los que se desvían las aguas llovedizas que corren por ramblas y *guadis* hacia paratas, bancales o parcelas de cultivo, la sistematización secundaria que conduce dichas aguas de avenida de manera ordenada y segura tiene una gran importancia. Tal es el caso del riego de boqueras (o de turbias) en el sureste español (Morales, 1969, 1989). En tales sistemas hay que cuidar el diseño (y su posterior mantenimiento) de las presas rústicas de desviación del agua, de los partidores, de las boqueras (agüeras o canales), de los sangradores (o vertederos) entre bancales y de los azarbes de retorno de las 'aguas sobrantes' a la rambla (si las hubiere).

Estos sistemas de recolección de agua son mucho más 'hidrodinámicos' que los tratados en esta colección de ejercicios. En ellos, los parámetros principales de diseño a que estamos acostumbrados (tamaño del área de impluvio, S_1; relación entre el área de impluvio y el área de recepción, $R = S_1/S_2$; o volumen de alcorque por unidad de superficie de la sistematización, *CAPA/S*) no resultan importantes para modelar el proceso. En cambio, el tamaño de las trampas de agua (*CAPA*) sí es determinante: Ha de ser tal que asegure una buena dosis de riego en el bancal cada vez que salga la rambla. *CAPA* se fija en base a criterios edáficos (Mongil & Martínez de Azagra, 2006).

Bibliografía

Bibliografía

Anónimo (2005): Catálogo de prácticas de conservación de suelo y agua. SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación de México). Disponible en www.sagarpa.gob.mex/desarrollorural (consulta: 29/04/2008)

Aubréville, A. (1949): Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. Société d'Éditions Géographiques, Maritimes et Coloniales. París

Codorníu Stárico, R. (1900): Apuntes relativos a la repoblación forestal en la Sierra de Espuña. Tipografía de Las Provincias de Levante. Murcia (España)

Critchley, W. & Siegert, K. (1991): Water harvesting. A manual for the design and construction of water harvesting schemes for plant production. FAO. Roma

Dixon, R.M. (1980): Land Imprinter. Patente nº 4185655. U.S. Patent Office. Washington

Dixon, R.M. (1983): Land imprinting for controlling infiltration and desertification processes. American Society of Agricultural Engineering. Paper Nº 83 – 2514

Dixon, R.M. & Carr, A.B. (2004): Land imprinting standards for accelerating succession past the exotic weed stage. Comunicación a la Decimosexta Conferencia Internacional de la Society for Ecological Restoration (en Victoria, Canadá). Disponible en http://imprinting.org [consulta en marzo de 2009]

Evenari, M. (1987): Und die Wüste trage Frucht. Ein Lebensbericht. Bleicher Verlag. Gerlingen (Alemania)

FAO (1994): Water harvesting for improved agricultural production. Water reports, nr. 3. FAO. Roma

Ferrer Julià, M. (2003): Análisis de nuevas fuentes de datos para la estimación del parámetro número de curva: Perfiles de suelos y teledetección. CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas). Madrid

García Salmerón, J. (1995): Manual de repoblaciones forestales. Tomo II. Fundación Conde del Valle de Salazar. E. T. S. de Ingenieros de Montes. Madrid

Koutou, M.; Ouédraogo, D.; Nacro, H.B. & Lepage, M. (2007): Déterminants de l'adoption du zaï forestier et perspectives de valorisation de la technique (province du Yatenga, Burkina Faso). Actes des 1res Journées Scientifiques Inter-Réseaux de l' Agence Universitaire de la Francophonie. Disponible en la página web: www.infotheque.info [marzo de 2009]

Lemus, M. & Navarro, G. (2003): Manual para el desarrollo de obras de conservación de suelo. Corporación Forestal Nacional. San Fernando (Chile)

López Bermúdez, F. (2002): Erosión y desertificación. Heridas de la tierra. Nivola Libros Ediciones. Madrid

López Bermúdez, F. (2008): Desertificación: preguntas y respuestas a un desafío económico, social y ambiental. Fundación Biodiversidad. Madrid

Martínez de Azagra Paredes, A. (1995): Modelo para la estimación de las disponibilidades hídricas en ladera. Tesis Doctoral en la E.T.S. de Ingenieros de Montes (Universidad Politécnica de Madrid). Inédita

Martínez de Azagra Paredes, A. (1996): Diseño de sistemas de recolección de agua para la repoblación forestal. Mundiprensa. Madrid

Martínez de Azagra Paredes, A. (2004): Guía para el programa informático MODIPÉ. Disponible en www.oasificacion.com [Manual de usuario de MODIPÉ 2.0.pdf]

Martínez de Azagra Paredes, A. (2006): Método de los coeficientes de escorrentía. Mauco generalizado. Disponible en www.oasificacion.com [Coeficientes de escorrentía.pdf]

Martínez de Azagra Paredes, A. (2008): Oasificacion.com: una página web sobre Hidrología Forestal. 2ª Reunión del Grupo de Trabajo de Hidrología Forestal de la Sociedad Española de Ciencias Forestales (Madrid, 25 y 26 – IX – 2008). Disponible en www.oasificacion.com [SECF Oasificacion.pdf]

Martínez de Azagra Paredes, A.; Mongil Manso, J. & Fernández de Villarán San Juan, R. (2002): Estudio hidrológico del aterrazado con subsolado mediante el modelo MODIPÉ. Ecología, 16: 37 - 44

Martínez de Azagra Paredes, A.; Mongil Manso, J. & Río San José, J. del (2003): Pequeña guía de uso del modelo MODIPÉ. Disponible en www.oasificacion.com [Pequeña guía de uso del modelo MODIPÉ.pdf]

Martínez de Azagra Paredes, A.; Mongil Manso, J.; Río San José, J. del & Rojo Serrano, L. (2006): Conceptos, modelos y ejemplos sobre oasificación. Ecología, 20: 453 – 470

Martínez de Azagra Paredes, A.; Pando Fernández, V.; Río San José, J. del & Navarro Hevia, J. (2006): Aproximación al conocimiento de la infiltración a través del análisis dimensional. Ecología, 20: 471 – 492

Mishra, S.K. & Singh, V.P. (2003): Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht (Holanda)

Mongil Manso, J. (2004): Desarrollo y aplicación de una metodología destinada al dimensionado de sistemas de recolección de agua para la restauración forestal en zonas áridas. Tesis Doctoral en la ETSIIAA de Palencia (Universidad de Valladolid). Inédita

Mongil Manso, J. & Martínez de Azagra Paredes, A. (2006): Diseño de repoblaciones forestales en zonas áridas: Tamaño del microembalse y relación entre el área de impluvio y el área de recepción. Investigaciones Geográficas, 40: 201 – 226

Monsalve Delgado, M.; Cuevas Sierra, Y.; Jerez de la Vega, M.; Jovellar Lacambra, L.C.; Martín Muñoz, J.C.; Muñoz Torrecilla, E.; Rueda Fernández, J. & Velasco Fernández, M.S. (1995): Manual de forestación. Junta de Castilla y León. Valladolid (España)

Montiel Pinilla, F. (1955): La lucha contra la erosión en la cuenca del río Segura. Montes, año XI: 349 – 354

Morales Gil, A. (1969): El riego con aguas de avenida en las laderas subáridas. Papeles de Geografía de la Universidad de Murcia, 1: 167 – 183

Morales Gil, A. (1989): Abandono y desorganización de los sistemas de riegos de turbias. Su incidencia en la escorrentía. En López Gómez, A. (ed.): Los paisajes del agua. Universidad de Valencia y Universidad de Alicante. Valencia (España)

Navarro Hevia, J.; Martínez de Azagra Paredes, A. & Mongil Manso, J. (2009): Hidrología de Conservación de Aguas. Captación de precipitaciones horizontales y escorrentías en zonas secas. Universidad de Valladolid (España)

Ouédraogo, M. & Kaboré, V. (1996): Le zaï, technique traditionelle de réhabilitation des terres dégradées au Yatenga (Burkina Faso). En: Techniques traditionelles de conservation de l'eau el des sols en Afrique: 119 - 126. Editorial Karthala. París

PAND (2008): Programa de Acción Nacional de Lucha contra la Desertificación, aprobado a través de la Orden ARM / 2444 / 2008 de 12 de agosto

Pemán García, J. & Navarro Cerrillo, R. (1998): Repoblaciones forestales. Universidad de Lérida (España)

Pizarro Tapia, R.; Flores Villanelo, J.P.; Sangüesa Pool, C.; Martínez Araya, E. & León Gutiérrez, L. (2008): Diseño hidrológico de zanjas de infiltración en el secano costero e interior de las regiones semiáridas de Chile. Bosque, 29 (2): 136 – 145

Proyecto JALDA (2002): Cartillas de capacitación en obras de conservación de suelos. Cartilla nº 6: Zanjas de infiltración. Sucre (Bolivia)

Rázuri Ramírez, L.; 1984. Estructura de conservación de suelos y aguas. Serie Riego y Drenaje, 32 (RD-32). Centro Interamericano de Desarrollo de Agua y Tierras. Mérida (Venezuela)

Río San José, J. del; Fernández de Villarán San Juan, R. & Martínez de Azagra Paredes, A. (1994): Programas básicos de ordenador III: Ficha hídrica de Thornthwaite y programas auxiliares. Escuela Universitaria Politécnica Agraria. Palencia (España)

Roose, E.; Kaboré, V. & Guenat, C. (1999): Zaï practice: a West African traditional rehabilitation system for semiarid degraded lands, a case study in Burkina Faso. Arid Soil Research & Rehabilitation, 13: 343 – 355

Sawadogo, H.; Hien, F.; Sohoro, A. & Kambou, F. (2001): Pits for trees: how farmers in semi-arid Burkina Faso increase and diversify plant biomass. En Reij & Water-Bayer (ed.): Farmer Innovation in Africa. A Source of Inspiration for Agricultural Development: 35 – 46. Earthscan. Londres

SCS (USDA) (1991): Engineering field handbook. Chapter 2. Washington

Serrada Hierro, R. (1993): Apuntes de repoblaciones forestales. Fundación Conde del Valle de Salazar. E. U. de Ingeniería Técnica Forestal. Madrid

Smith, P.N. & Maidment, D.R. (1995): Hydrologic data development system. Center of Research in Water Resources. Disponible en www.ce.utexas.edu/prof/ maidment

Torre Antón, M. (1995): Repoblación forestal. Preparación del terreno mediante el método de ahoyado mecanizado con bulldozer y rejón modificado. Montes, 41: 37 – 43

Udall, S.L. & Dominy, F.E. (1966): Diseño de presas pequeñas. Editorial Continental. México D.F. (México)

Apéndices

Apéndice 1: Tabla general del método del número de curva
(en condición 2 de humedad y $P_0 = 0{,}2 \cdot S$)

TIPO DE VEGETACIÓN	TRATAMIENTO	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	88
	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	89
	R	Buena	58	72	81	85
	C	Pobre	64	75	83	85
	C	Buena	55	69	78	83
	C + T	Pobre	63	73	80	83
	C + T	Buena	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	88
	C	Regulares	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 pobre	56	75	86	91
	-	II Pobre	46	68	78	84
	-	III Regular	36	60	70	76
	-	IV Buena	26	52	63	69
	-	V Muy buena	15	44	54	61
Caseríos	-	-	59	74	82	86
Caminos en tierra	-	-	72	82	87	89
Caminos en firme	-	-	74	84	90	92

CR = Cubierta de residuos; R = Labores en línea recta; C = Labores en curvas de nivel; T = Terrazas

Apéndice 2: Tabla de *N* para zonas áridas y subdesérticas
(en condición 2 de humedad y $P_0 = 0{,}2 \cdot S$)

TIPO DE VEGETACIÓN	CONDICIÓN HIDROLÓGICA	TIPO DE SUELO A	B	C	D
1. Herbazal con algo de matorral	Pobre	70*	80	87	93
	Media	60*	71	81	89
	Buena	50*	62	74	85
2. "Oak brush", "aspen", "mountain mahogany", "bitter brush", "maple"	Pobre	55*	66	74	79
	Media	37*	48	57	63
	Buena	25*	30	41	48
3. "Pinyon", "juniper", o ambos, con cubierta herbácea	Pobre	60*	75	85	89
	Media	45*	58	73	80
	Buena	25*	41	61	71
4. "Sagebrush" con cubierta herbácea	Pobre	55*	67	80	85
	Media	40*	51	63	70
	Buena	25*	35	47	55
5. Matorral desértico: palo verde, mesquite, cactus, "bursage", "saltbrush", etc.	Pobre	63	77	85	88
	Media	55	72	81	86
	Buena	49	68	79	84

Especies mencionadas en la descripción del tipo de vegetación:

Tipo 2

- "Oak brush" = *Quercus gambelii*
- "Aspen" = *Populus tremuloides* y *P. fremontii*
- "Mountain mahogany" = *Cercocarpus ledifolius*
- "Bitter brush" = *Purshia tridentata*
- "Maple" = *Acer grandidentatum*

Tipo 3

- "Pinyon" = *Pinus edulis* y *Pinus monophylla*
- "Juniper" = *Juniperus osteosperma*

Tipo 4

- "Sagebrush" = *Artemisia tridentata*

Tipo 5

- "Saltbrush" = *Atriplex reptans*
- "Greasewood" = *Ambrosia dumosa*
- "Creosotebrush" = *Larrea tridentata*
- "Blackbrush"= *Coleogyne ramosissima*
- "Bursage" = *Bursera californica*
- Palo verde = *Cercidium americanum*
- Mesquite = *Prosopis glandulosa*
- Cactus = *Carnegiea gigantea; Opuntia* spp.

El significado de los adjetivos de la condición hidrológica es:

- Pobre.- Si menos del 30 % del suelo está cubierto por hojarasca, hierba o matorral.
- Media.- Si la cobertura está comprendida entre el 30 y el 70 %.
- Buena.- Si la protección vegetal del suelo es superior al 70 %.

* Valores añadidos por Smith & Maidment (1995)

Apéndice 3: Correspondencia hidrológica entre asociaciones vegetales americanas y españolas

TIPO DE VEGETACIÓN DE ZONAS ÁRIDAS AMERICANAS	**EQUIVALENCIA PARA LAS ZONAS ÁRIDAS ESPAÑOLAS**
1. Herbazal con algo de matorral	Herbazal de *Brachypodium retusum* con algo de matorral subdesértico
2. "Oak brush", "aspen", "mountain mahogany", "bitter brush", "maple"	Coscojar, monte bajo de rebollo (aunque en condiciones de mucha más sequedad). *Rhamnus lycioides*
3. "Pinyon", "juniper", o ambos, con cubierta herbácea	Enebral claro de *Juniperus thurifera* con *Pinus nigra* dispersos. Sabinar de *J. phoenicea* con *Pinus halepensis*
4. "Sagebrush" con cubierta herbácea	*Artemisia herba-alba* *Artemisia campestris*
5. Matorral desértico: palo verde, mesquite, cactus, "bursage", "saltbrush", etc.	Vegetación del semiárido murciano y almeriense: *Thymelaea hirsuta, Atriplex glauca, Zizyphus lotus, Rhamnus lycioides*

Apéndice 4: Ponderación de números de curva

Para profundizar y comprender las ecuaciones principales del modelo MODIPÉ bueno es plantearse cuatro situaciones diferentes con dos complejos hidrológicos asociados entre sí de distinta manera y cuyos números de curva son N_1 y N_2 (entiéndase *NI* y *NR*, en un paso posterior).

Situación ①

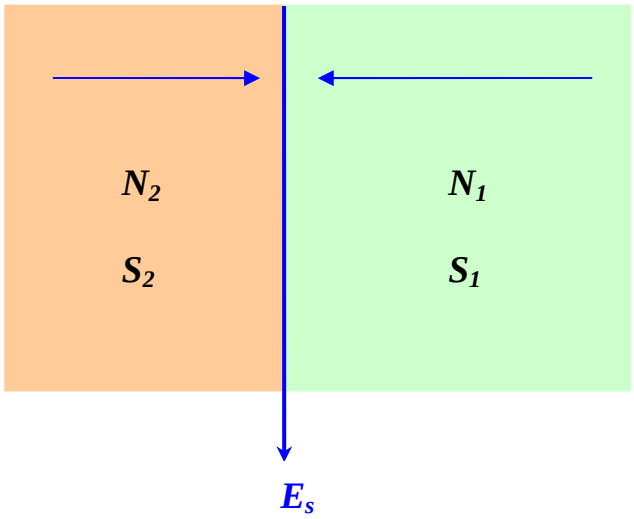


Figura A: Dos complejos hidrológicos (N_1 y N_2) contiguos pero independientes entre sí

En este caso la escorrentía de los dos complejos hidrológicos debe calcularse por separado para hallar la escorrentía total (E_s).

$$E_s = E_{s1} + E_{s2} = \frac{\left(P - \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot N_1}{N_1}\right)^2}{P + 4 \cdot \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot N_1}{N_1}} \cdot S_1 + \frac{\left(P - \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot N_2}{N_2}\right)^2}{P + 4 \cdot \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot N_2}{N_2}} \cdot S_2 \quad \text{(en litros)}$$

Sería incorrecto, a todas luces, trabajar con un número de curva promedio (*NM*) para hallar la escorrentía superficial (E_s), pues los dos complejos hidrológicos no interactúan.

$$NM = \frac{N_1 \cdot S_1 + N_2 \cdot S_2}{S_1 + S_2}$$

Situación ②

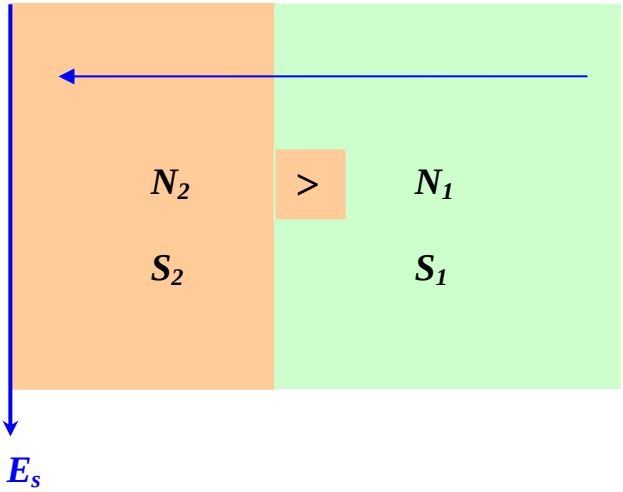


Figura B: Dos complejos hidrológicos contiguos e interrelacionados hidráulicamente, siendo el número de curva del área superior menor que el del área dominada ($N_1 < N_2$)

El cálculo de escorrentías también conviene realizarlo por separado, al igual que en la situación ①. Es así como opera MODIPÉ cuando $NR > NI$.

Se está admitiendo que *nada* de la escorrentía del complejo hidrológico 1 (el situado a mayor cota) puede infiltrarse en el complejo hidrológico 2, lo cual es bastante cierto pues cuando 1 aporta escorrentía a 2, el complejo 2 lleva ya tiempo saturado de agua y aportando escorrentía a la vaguada inferior.

En la situación ② sí que hay una interrelación entre los dos complejos hidrológicos (a diferencia de en la situación ①), pero se admite que el balance de la escorrentía neta en el complejo 2 es nulo. No se produce en el complejo hidrológico 2 más infiltración por el hecho de estar S_1 encima de S_2.

Situación ③

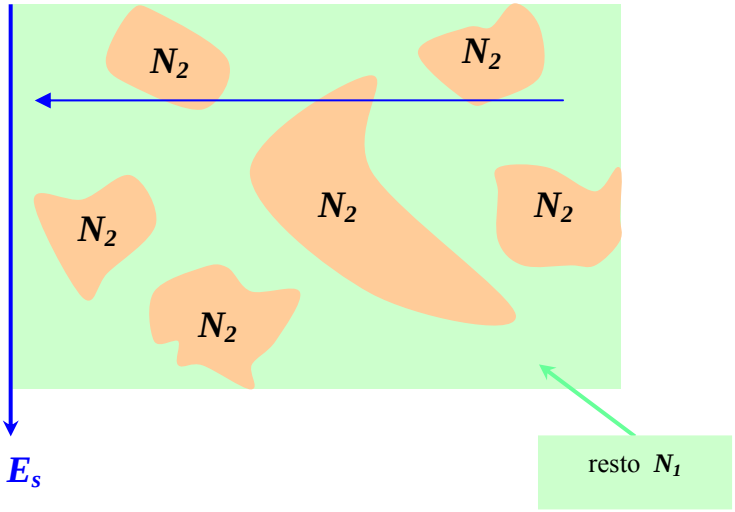


Figura C: Dos complejos hidrológicos (N_1 y N_2) interconectados y distribuidos al azar dentro de un área conjunta

N_1 y N_2 están distribuidos de forma "aleatoria" dentro del territorio, sin un orden preestablecido.

En este caso, la escorrentía superficial que proporciona el territorio debe calcularse a partir de un número de curva promedio (*NM*).

$$NM = \frac{N_1 \cdot S_1 + N_2 \cdot S_2}{S_1 + S_2}$$

$$E_s = \frac{\left(P - \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot NM}{NM}\right)^2}{P + 4 \cdot \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot NM}{NM}} \cdot (S_1 + S_2) \quad \text{(en litros)}$$

Situación ④

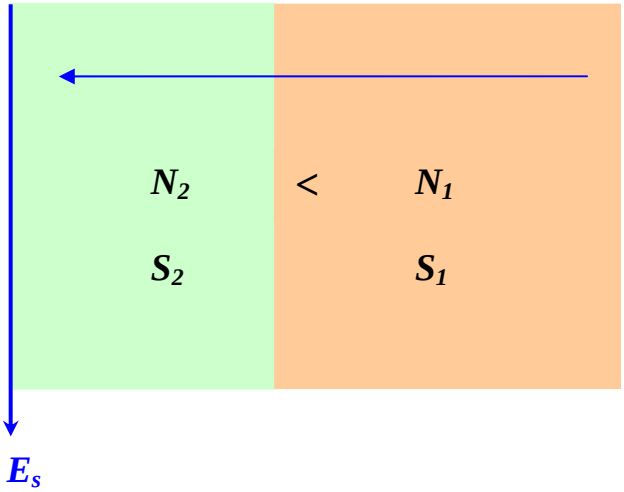


Figura D: Dos complejos hidrológicos contiguos e interrelacionados hidráulicamente, siendo el número de curva del área superior mayor que el del área dominada ($N_1 > N_2$)

En esta situación, también conviene trabajar con un número de curva promedio (*NM*) a la hora de calcular la escorrentía (E_s), pues algo de la escorrentía del complejo hidrológico superior (S_1 y N_1) se infiltrará en S_2 (pues $N_2 < N_1$). Este fenómeno se pretende contemplar y evaluar hallando un número de curva medio (*NM*).

Es así como opera MODIPÉ cuando *NR* < *NI*. MODIPÉ pondera para evidenciar que la posición de S_2 debajo de S_1 (cuando *NR* < *NI*) favorece, de por sí, la recolección de agua en el área de recepción (en S_2). El programa halla *NM* y *P0*.

$$NM = \frac{N_1 \cdot S_1 + N_2 \cdot S_2}{S_1 + S_2} \quad \text{(adimensional)}$$

$$P0 = \frac{5.080 - 50{,}8 \cdot NM}{NM} \quad \text{(en mm)}$$

Situación ⑤

La figura E esquematiza una sistematización primaria parcial.

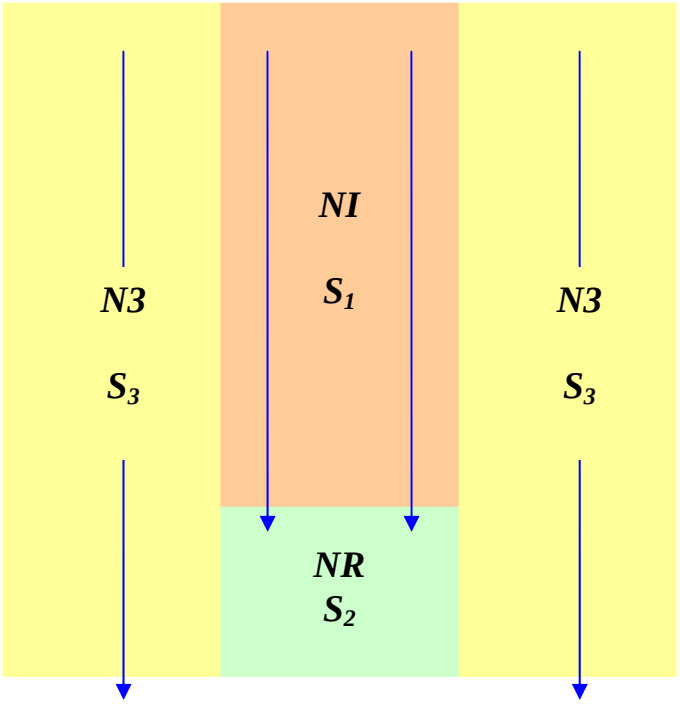


Figura E: Sistematización primaria incompleta con dos pasillos laterales de escorrentía (S_3, *N3)* independientes de la sistematización primaria (formada por un área de impluvio y un área de recepción, S_1 +S_2)

La escorrentía en los pasillos no se ve afectada por lo que ocurre en la unidad sistematizada (en S_1 y S_2). Se trata de procesos de escorrentía separados, razón por la cual:

$$P3 = 0{,}2 \cdot \frac{25.400 - 254 \cdot N3}{N3}$$ (umbral de escorrentía en los pasillos; en mm)

$$PAS = P - T \cdot \frac{(P - P3)^2}{P + 4 \cdot P3}$$ (disponibilidad hídrica en los pasillos; en mm)

$$PROM3 = \frac{PIMP \cdot S_1 + DESP \cdot S_2 + PAS \cdot S_3}{S_1 + S_2 + S_3}$$ (disponibilidad hídrica promedio en la sistematización)

Apéndice 5: Valores orientativos para el diseño de zanjas de infiltración

Magnitud	Símbolo (unidad)	Dimensiones habituales (y extremas)	Observaciones
Ancho de la base de la zanja	b (m)	0,30 – 0,50 (0,1 – 1,0)	Valores inferiores para construcción manual; valores superiores para construcción mecanizada
Profundidad excavada (o en desmonte)	H_d (m)	0,25 – 0,50 (0,2 – 1,0)	
Talud superior	z_{sup} (adim.)	1,0 – 1,5 (0,5 – 2,0)	Pendiente de los taludes depende del tipo de suelo y de su estabilidad (en seco y en húmedo)
Talud inferior	z_{inf} (adim.)	1,25 – 1,5 (1,0 – 2,0)	
Talud del terraplén	z_t (adim.)	1,25 – 1,5 (1,0 – 2,0)	
Altura del caballón (o profundidad del terraplén)	H_t (m)	0 – H_d	Hay autores que prescinden de H_t en sus cálculos.
Profundidad total de la zanja (= H_d+ H_t)	H (m)	0,30 – 0,60 (0,2 – 1,0)	No se aconsejan zanjas de más de 1 m de profundidad.
Ancho de la berma (o mota)	b_1 (m)	0,30 – 0,50 (0,1 – 1,0)	Similar a b Bermas estrechas obligan a trabajar con un resguardo.
Largo de la zanja	L (m)	3,0 – 6,0 (2 – 10)	No se aconsejan zanjas continuas de más de 10 m de longitud.
Separación entre zanjas contiguas	S_{ep} (m)	0,2 - L	Con separaciones pequeñas cabe hacer rebajes de conexión entre zanjas a nivel.
Distanciamiento entre zanjas consecutivas	D (m)	6 – 50	Valores interdependientes a través de la ecuación de endorreísmo
Sección transversal de la zanja	A (m^2)	0,1 – 1,5	

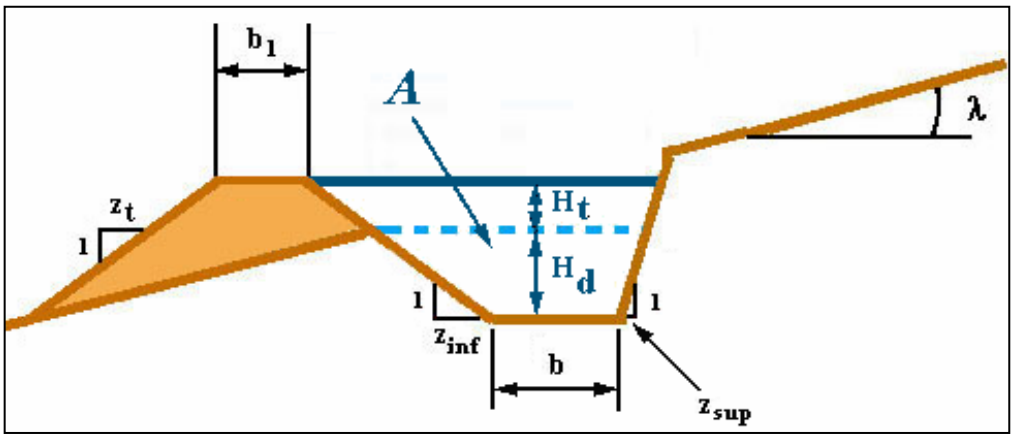


Figura F: Sección transversal de una zanja con sus dimensiones principales

Apéndice 6: Relación de símbolos principales

Símbolo	Significado
a	Anchura de la explanación (en terrazas); longitud característica del suelo según el eje horizontal x (en la ecuación general de infiltración)
A	Tipo de suelo (en el método del número de curva)
A	Sección mojada máxima (a resguardo nulo)
ANTES	Disponibilidad hídrica en la ladera antes de la sistematización
A_t	Pérdidas de suelo tolerables al año (de promedio) (modelo USLE)
b	Longitud característica del suelo según el eje horizontal y
B	Tipo de suelo (en el método del número de curva)
c, c_0, c_1	Longitud característica del suelo según el eje vertical z
C	Tipo de suelo (en el método del número de curva)
C	Coeficiente de escorrentía; (Factor cubierta vegetal o cultivo en el modelo USLE)
CAPA	Capacidad del microembalse
CAPAL	Capacidad mínima del alcorque para retener toda la lluvia neta (=escorrentía) que se produce en la unidad sistematizada = *MAX*
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
d, d_0, d_1	Longitud de poros característica (o diámetro característico) del horizonte j (= 0 ó 1)
D	Tipo de suelo (en el método del número de curva)
D	Distancia horizontal entre terrazas (o zanjas de infiltración) consecutivas
DESP	Disponibilidad hídrica (≈ agua infiltrada) en el área de recepción
e	Equidistancia entre plantas dentro de una línea de plantación (en terrazas)
$e(t)$	Escorrentía superficial desde el área de impluvio hasta el área de recepción en el instante t
E	Evaporación física desde la superficie del suelo
E_s	Escorrentía superficial (genérico)
E_{s1}	Escorrentía generada en el área de impluvio y que alimenta al área de recepción (escorrentía que provoca la recolección de agua)
E_{s2}	Escorrentía que escapa del área de recepción (≈ de la unidad sistematizada)
f	Capacidad de infiltración
f_c	Capacidad de infiltración final (mínima)
$F(h)$	Caudal de salida a través del vertedero (o rebosadero) de la unidad sistematizada (y que es función de la carga de vertido h)
h	Carga de vertido ($h = y - H$, siempre que $y > H$)
H	Altura de las represas, de los muretes del microembalse; profundidad de la poceta, de la zanja de infiltración, etc. (¡no confundir con p!)
$i(t)$	Intensidad de lluvia en el instante t
I	Infiltración
I_t	Intercepción (=interceptación)
J	Condición previa de humedad (J = 1, 2, ó 3)

k, k_0, k_1	Permeabilidad (conductividad hidráulica a saturación) de un horizonte del suelo (j = 0, horizonte superficial; j = 1, horizonte subyacente)
K	Factor de erosionabilidad del suelo (modelo USLE)
$L{\cdot}S$	Factor topográfico (modelo USLE)
MAX	Escorrentía máxima que puede escapar de la unidad sistematizada para alcorque nulo (= *CAPAL*)
n	Número de pies plantados por hectárea, densidad de repoblación; número de líneas de plantación incluidas en cada plataforma (terrazas)
na	Número de días del mes con precipitación apreciable (más de 0,1 mm)
n_t	Densidad de repoblación en las terrazas
n_1 y n_2	Número de veces que 'caen' los aguaceros virtuales P_{v1} y P_{v2}
N	Número de curva (genérico)
NAC	Número de curva de la ladera actual (degradada)
NEQ	Número de curva equivalente de la unidad sistematizada (considerando el efecto del microembalse)
NI	Número de curva del área de impluvio
NM	Número de curva promedio de la unidad sistematizada sin considerar el efecto del alcorque
N_{obj}	Número de curva objetivo (en la restauración de la ladera)
NR	Número de curva del área de recepción
N3	Número de curva de los pasillos de escorrentía
p	Profundidad natural del suelo; profundidad de suelo removida en la preparación (¡no hay que confundir con *H*!)
P	Precipitación de un aguacero; (factor de prácticas de conservación de suelos en el modelo USLE)
PAC	Umbral de escorrentía de la ladera degradada
PAS	Disponibilidad hídrica en los pasillos de escorrentía
PIMP	Disponibilidad hídrica en el área de impluvio
P_c	Precipitación de cálculo
P_m	Precipitación mensual
$P_{máx}$	Precipitación máxima diaria del mes
PR	Umbral de escorrentía del área de recepción
PROM	Disponibilidad hídrica promedio en la unidad sistematizada (= en la ladera, si la sistematización primaria es completa)
PROM3	Disponibilidad hídrica promedio en una sistematización primaria incompleta
PUM	Precipitación umbral o límite de un alcorque aislado
P_{v1} y P_{v2}	Precipitaciones virtuales
P_0	Umbral de escorrentía (genérico)
P0	Umbral de escorrentía medio de la unidad sistematizada sin considerar el efecto del alcorque
*P*1	Precipitación mínima (= umbral de escorrentía en el área de impluvio)
*P*2	Precipitación límite (= umbral de escorrentía de la unidad sistematizada considerando el efecto alcorque)
P3	Umbral de escorrentía en los pasillos de una sistematización primaria incompleta
P4	Precipitación máxima que puede ser evacuada de forma ordenada por la sistematización secundaria
P5	Precipitación total caída durante los cinco días previos al aguacero a analizar (o estimador mensual de dicha variable)

R	Relación entre el área de impluvio y el área de recepción; (Índice de erosión pluvial del modelo USLE)
R, Rn	Respuesta, respuesta a la pregunta número n
R_h	Radio hidráulico
S	Tamaño de la unidad sistematizada ($S = S_1 + S_2$); o retención máxima posible (método del número de curva)
S_p	Superficie puesta a disposición de cada planta, según el marco de plantación
S_1	Superficie correspondiente al área de impluvio
S_2	Superficie del área de recepción
S_3	Superficie de los pasillos de escorrentía
t	Tiempo
y	Calado, nivel de inundación en el área de recepción
$v_i(t)$	Velocidad de infiltración en el área de impluvio (en el instante t)
$w_i(t)$	Velocidad de infiltración en el área de recepción (en el instante t)
δ	Pendiente del talud en desmonte
ε	Contrapendiente de la explanación (en terrazas de absorción)
λ	Pendiente de la ladera
τ	Pendiente del talud en terraplén
ξ, ξ_0, ξ_1	Tortuosidad del flujo de agua en el horizonte del suelo (j = 0, horizonte superficial; j = 1, horizonte subyacente)

Apéndice 7: Regiones oasificables

El mapamundi que figura en la portada y en la última página de este trabajo es una primera aproximación que permite conocer en qué zonas del Planeta es posible aplicar la metodología de cálculo recogida en este libro. Busca responder a la pregunta: ¿Qué lugares pueden ser oasificados, caso de estar degradados?

El sistema de proyección seleccionado para el mapa es el de Winkel-Tripel, por ser equitativo a la hora de representar superficies de tierra emergidas.

Para la elaboración del mapamundi se han reclasificado dos capas cartográficas: el índice de aridez (DryLand_2 [7]) y la cartografía de la clasificación climática mundial de Köppen (según el mapa de Geiger de 1961). La primera permite identificar las regiones oasificables (en primera aproximación) mientras que la segunda ubica la situación de los hielos.

Zonas hiperáridas _____Desiertos templados y cálidos (amarillo)
Zonas áridas _____Zonas oasificables (verde)
Zonas semiáridas _____Zonas oasificables (verde)
Zonas secas subhúmedas _____Zonas oasificables (verde)

Zonas Köppen 61-EF (hielo) _____Zonas de hielo (blanco)
Zonas Köppen 62-ET (alta montaña)_____Zonas de hielo (blanco)

FUENTES

Kottek, M.; Grieser, J.; Beck, C.; Rudolf, B. & Rubel, F. (2006): World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorologische Zeitschrift, 15 (3)**:** 259 – 263

CRU/UEA & UNEP/GRID **(**1997): Dryland_2. UNEP-WCMC, Millennium Ecosystem Assessment. Island Press. Washington

Cartografía de Köppen: disponible en //koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/

Cartografía del índice de aridez: disponible en
\\GIS-PC-14\C$\Millennium_Assessment\MA_data\core_data_geo\systems\dryland_2.shp

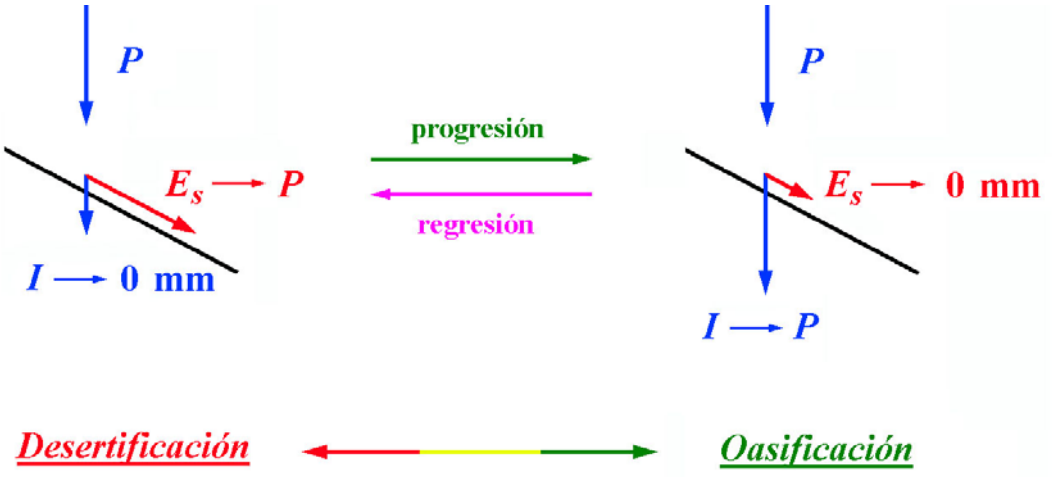
[7] La cartografía digital Dryland_2 es un conjunto de datos espaciales empleada en la elaboración del mapa de zonas áridas, inicialmente creado por CRU/UEA, UNEP/GRID para el "Atlas mundial de la desertificación". Se ha utilizado también en la "Evaluación de ecosistemas del milenio" para la definición de los sistemas de tierras secas.

Las zonas áridas se obtuvieron a partir del índice de aridez, que se calcula como cociente de la precipitación anual (*P*) y la evapotranspiración potencial anual (*ETP*). Este índice climático caracteriza la aridez del paisaje. Conviene señalar que este índice depende de factores exclusivamente climáticos, por lo que no considera elementos tan relevantes como las características hidrofísicas del suelo y la vegetación. No obstante su sencillez, este índice es recomendado por el PNUMA y actualmente es el adoptado por la "Convención Internacional de Lucha Contra la Desertificación y la Sequía".

Las zonas incluidas en el conjunto de datos son: hiperáridas ($P/ETP < 0{,}05$), áridas ($0{,}05 < P/ETP < 0{,}2$), semiáridas ($0{,}2 < P/ETP < 0{,}5$) y secas subhúmedas ($0{,}5 < P/ETP < 0{,}65$). Este conjunto de datos ha sido utilizado para definir el sistema de tierras secas del informe del milenio. El índice de aridez utiliza datos climáticos del periodo 1951 – 1980, a partir de los cuales se obtuvieron mapas climáticos mensuales sobre los que se calculó, finalmente, la media anual.

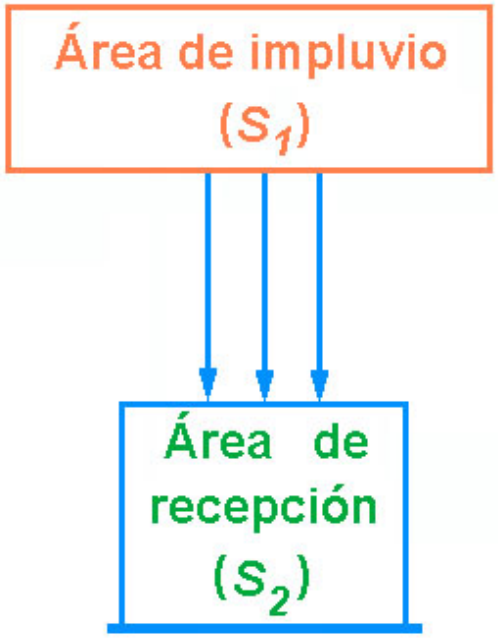
Apéndice 8: Esquemas

*** Oasificación contra desertificación**

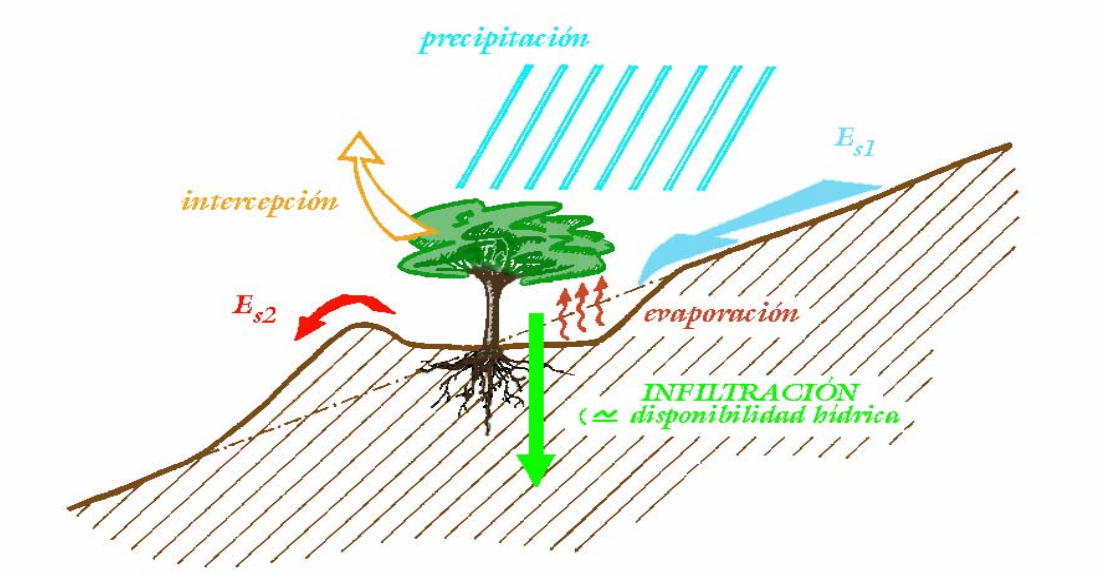


[P = precipitación; E_S = escorrentía superficial; I = infiltración]

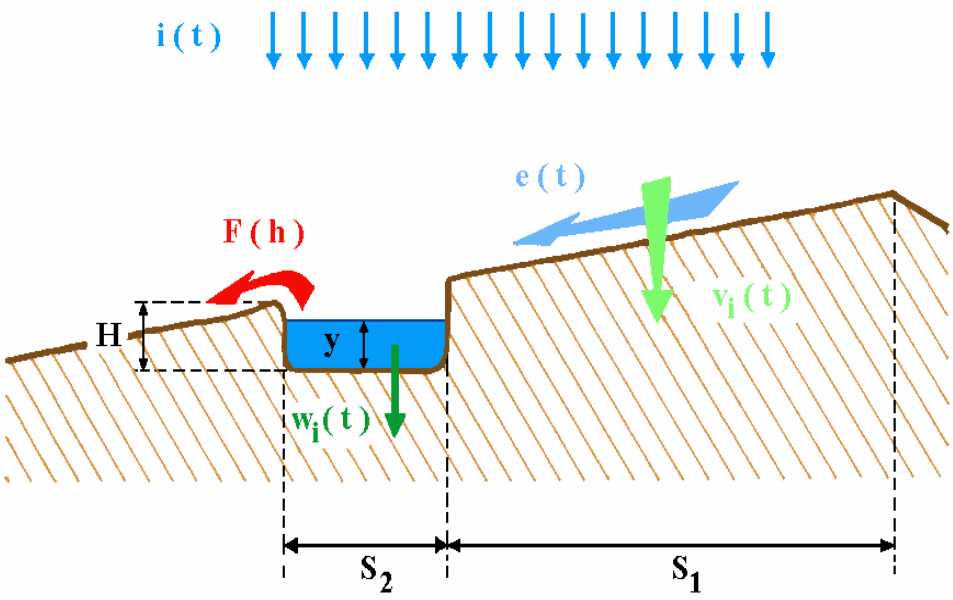
*** Principio de la recolección de agua**



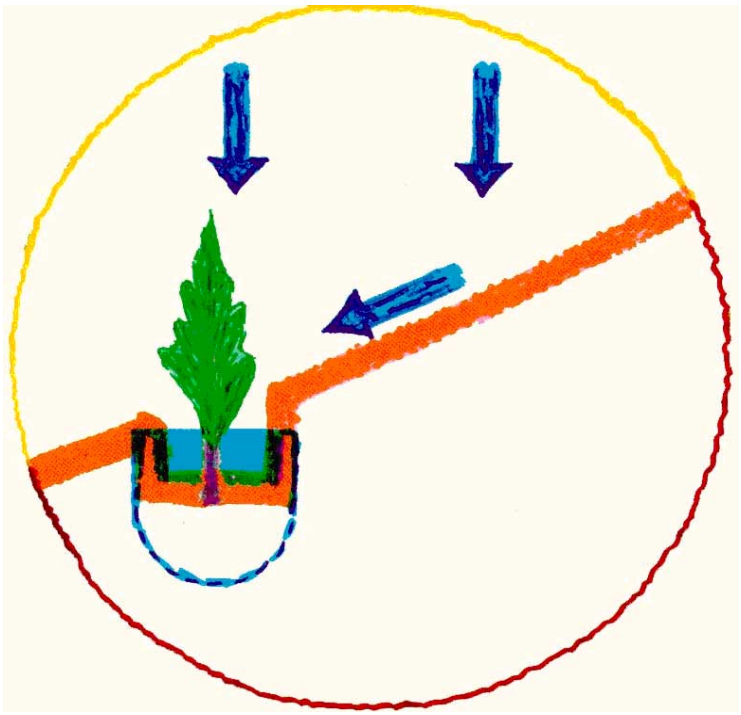
*** Balance Hídrico de la Hidrología de Conservación de Aguas**



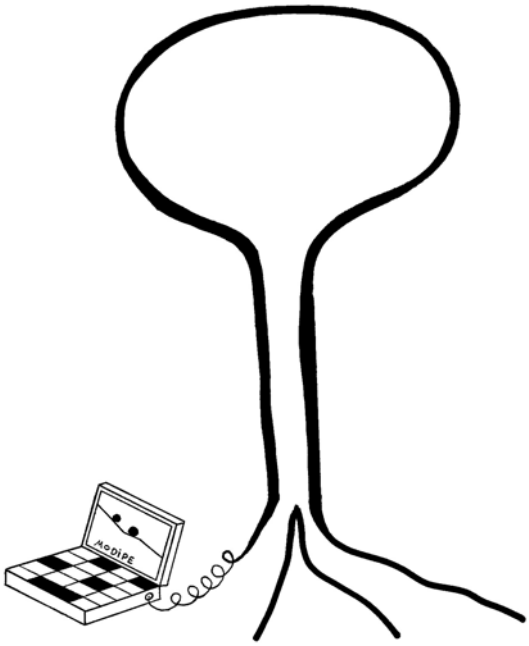
*** Modelo general de un sistema de recolección de agua**



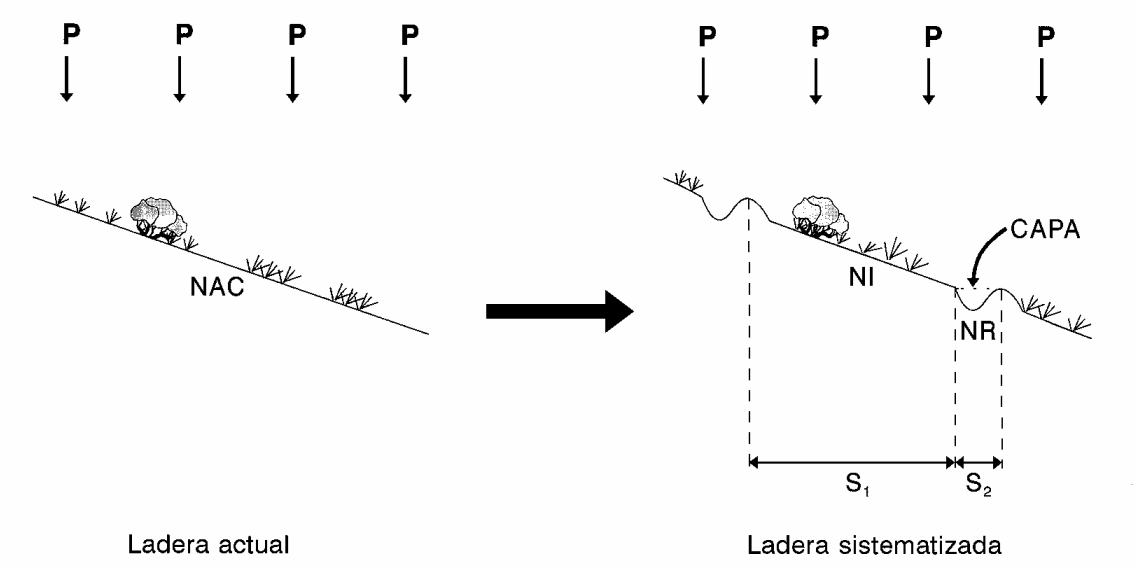
*** Símbolo del programa MODIPÉ**



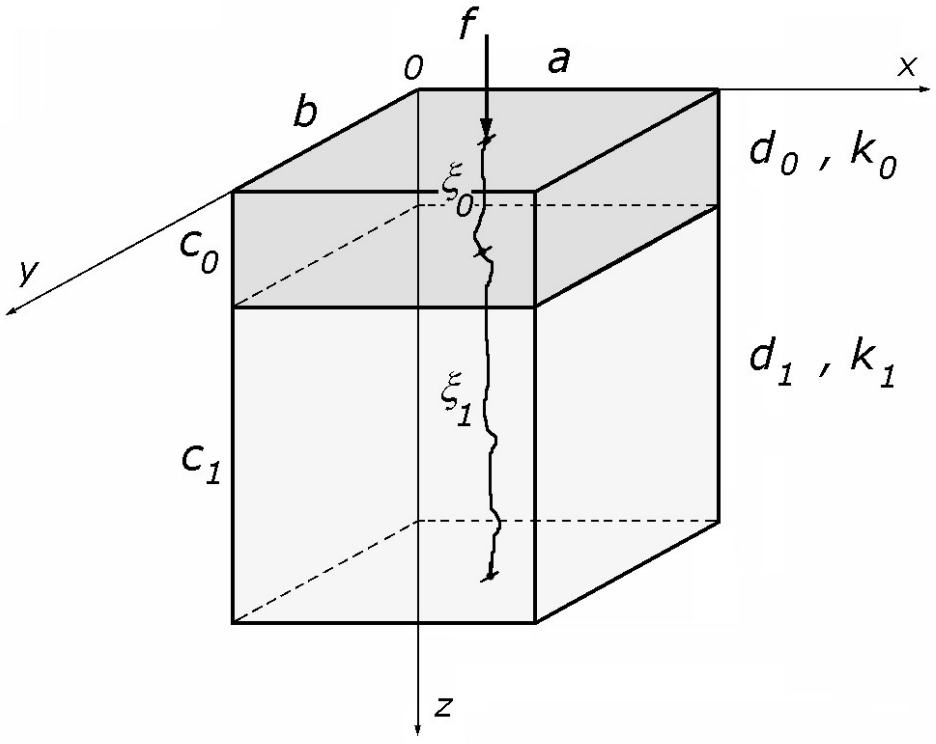
*** Alegoría informática sobre MODIPÉ**



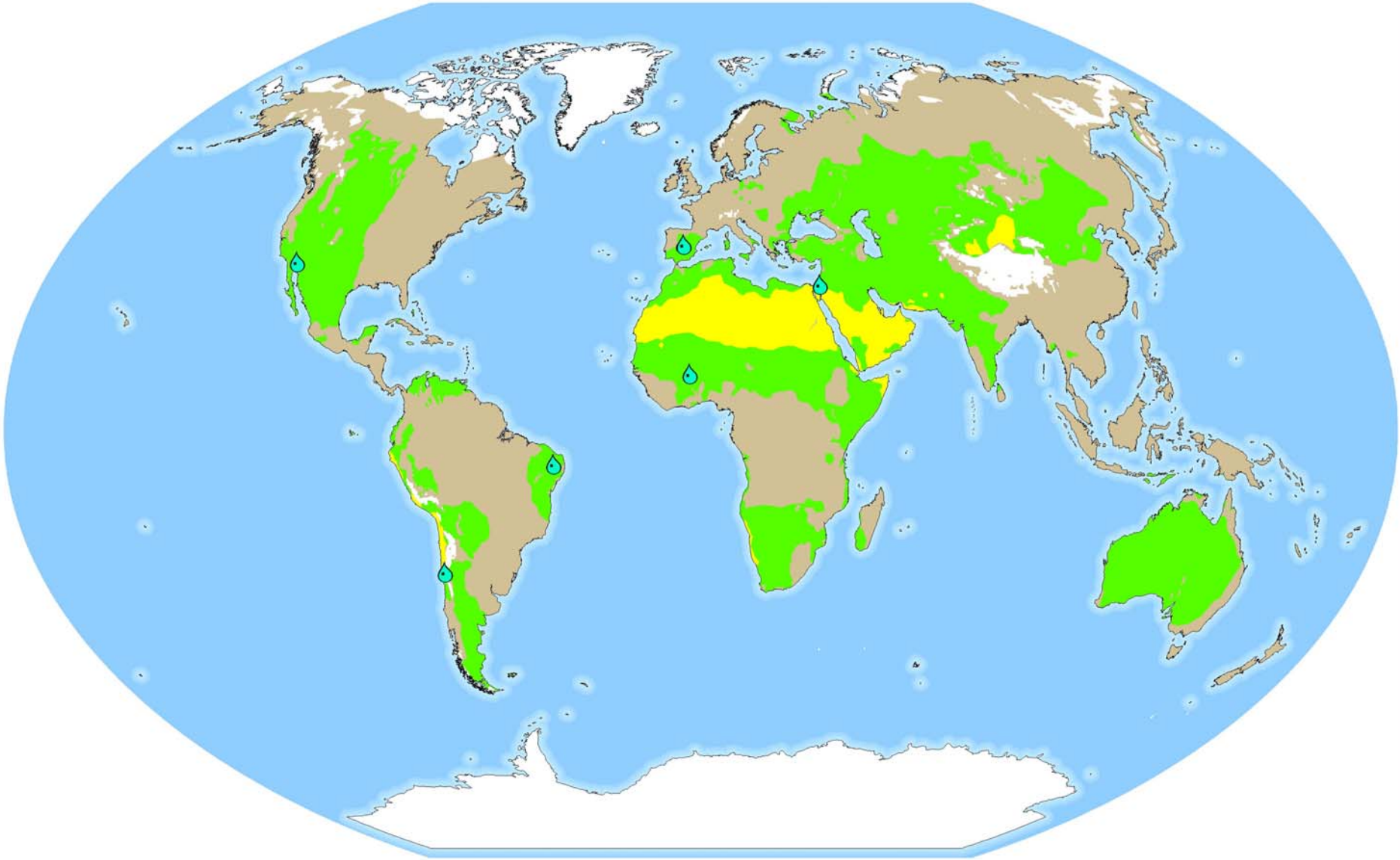
*** Datos de entrada del modelo MODIPÉ**



*** Algunas magnitudes importantes que intervienen en la infiltración**



Regiones oasificables



Leyenda
Regiones oasificables
Desiertos cálidos y templados
Hielos
Estudio de casos

0 1000 2000 3000 4000 km

Proyección Winkel-Tripel

www.oasification.com

Año 2009

Primera edición