

## ESTUDIO HIDROLÓGICO DEL ATERRAZADO CON SUBSOLADO MEDIANTE EL MODELO MODIPÉ\*

ANDRÉS MARTÍNEZ DE AZAGRA<sup>1</sup>, JORGE MONGIL<sup>1</sup> Y RUBÉN FERNÁNDEZ DE  
VILLARÁN<sup>2</sup>

### RESUMEN

En el momento de proyectar cualquier reforestación en una zona árida situada en ladera, la economía del agua juega un papel preponderante. La consecución de cosechas de agua para los brinzales en sus primeras etapas de vida resulta crucial para el éxito de la empresa. Una preparación del suelo para la repoblación forestal frecuente desde hace varios decenios es el aterrazado con subsolado, debido a sus beneficiosos efectos hidrológicos. Sin embargo, existen muchos detractores de este tratamiento, al inducir también un alto impacto paisajístico y a menudo efectos indeseados sobre el suelo y la vegetación preexistente. Por este motivo, el diseño de los aterrazados debe basarse en criterios de economía del agua, en los que el modelo hidrológico MODIPÉ puede ser una herramienta a considerar. De esta forma se pueden minimizar los movimientos de tierra que las terrazas llevan emparejados.

**Palabras clave:** Cosecha de agua, terraza en contrapendiente (=de absorción), restauración de zonas áridas.

### SUMMARY

Hydrological study of reverse-sloped terraces using Modipé model.

Water economy plays the most crucial role as reforesting slopes in arid zones. Appropriate water harvesting techniques allow seedlings to survive largely by improving their chances of successful establishment and development. Under Spanish conditions and within the frame time of the last few decades, terracing has been one of the most widely adopted procedures in soil preparation for reforestation, owing to its supposedly beneficial hydrological effects. But several hydrological schools of thought hold strong views against such a technique because of its adverse landscape effects considered to be mostly undesirable for both soils and vegetation. For this reason, the design of reverse-sloped terraces must be firmly based on water economy criteria and in this context the hydrologic

<sup>1</sup> Unidad Docente de Hidráulica e Hidrología. E.T.S. de Ingenierías Agrarias (Universidad de Valladolid). Avenida de Madrid, 57 - 34004 Palencia. Correo electrónico: amap@iaf.uva.es; jmongil@iaf.uva.es

<sup>2</sup> E.P.S. de La Rábida (Universidad de Huelva). Carretera de Palos de la Frontera, s/n - 21819 Palos de la Frontera (Huelva). Correo electrónico: ruben@uhu.es

\* Este trabajo ha sido financiado por la DGCONA en el ámbito de su proyecto LUCDEME (Lucha contra la Desertificación en el Mediterráneo).

Recibido: 01.10.2001

Aceptado: 27.05.2002

model MODIPÉ should be viewed as an interesting tool worth considering. Thus foresters will be able to minimize the negative effects of this soil preparation procedure.

**Key words:** Water harvesting, bench terrace, arid zones reforestation.

## INTRODUCCIÓN

Un sistema de recolección de agua consiste en dos partes, un área donde se induce y genera la escorrentía superficial (área de impluvio o productora) y un área donde se recogen y almacenan dichos aportes hídricos (área de recepción o colectora). Es en esta área donde se sitúa una cisterna, 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 (MARTÍNEZ DE AZAGRA 1998).

La mayor parte de los métodos de preparación del suelo en el sector forestal persiguen obtener cosechas de agua con las que invertir procesos de desertización por aridez edáfica (MARTÍNEZ DE AZAGRA & CALVO 1996). Al aumentar la infiltración en la ladera se favorece la instalación de una vegetación más tupida, especialmente en climas áridos. (Figura 1.)

El modelo hidrológico MODIPÉ (MARTÍNEZ DE AZAGRA 1996) puede resultar muy útil para el correcto diagnóstico de muchos procesos de desertificación (=desertización) y para una acertada toma de decisiones a la hora de restaurar laderas degradadas. En este sentido, puede servir para:

- caracterizar microclimas de ladera.
- comprender los procesos de desertización por aridez edáfica.
- simular el comportamiento hidrológico de cualquier unidad sistematizada.
- evaluar el efecto hídrico que tienen los diferentes procedimientos de preparación del suelo en repoblaciones forestales.
- diseñar trampas de agua con las que incrementar la infiltración y así facilitar el arraigo y primer crecimiento del repoblado en climas mediterráneos.
- calcular el volumen mínimo de tierras a remover en una ladera degradada para iniciar su “oasificación”.

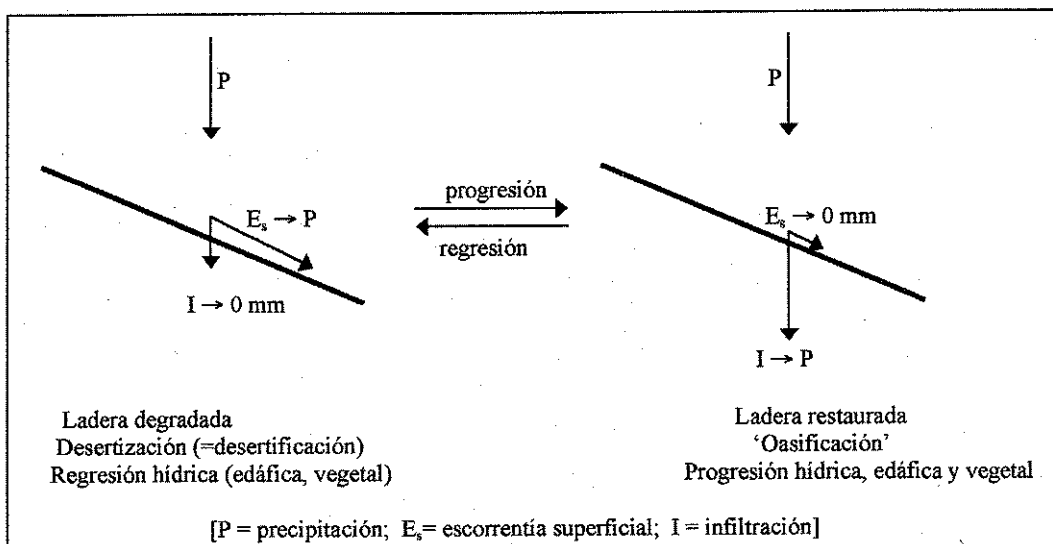


Figura 1. Progresión hídrica, edáfica y vegetal desde una ladera degradada hasta una restaurada.

Figure 1. Hidric, edafic and vegetal progression from a degraded to a restored slope.

Una preparación del suelo frecuente en repoblaciones forestales desde la aparición de los tractores de cadenas ha sido el aterrazado con subsolado. Consiste en la formación de terrazas o plataformas horizontales o con cierta contrapendiente en una ladera, según curvas de nivel, mediante la ejecución de un desmonte y un terraplén, con anchura suficiente para la circulación del tractor que las construye y que son subsoladas en toda su longitud (SERRADA 1993). Los efectos hidrológicos de las terrazas son muy importantes, ya que anulan prácticamente la escorrentía en la ladera, aumentan la capacidad de infiltración, limitan el arrastre del suelo y evacúan el agua sobrante (PEMÁN & NAVARRO 1998). Estas consideraciones son fundamentales para el adecuado diseño de esta preparación del suelo.

Sin embargo, el aterrazado es un procedimiento de preparación del suelo muy discutido actualmente, fundamentalmente porque provoca un impacto paisajístico elevado y duradero (SERRADA 1993). Algunos autores añaden otros tipos de perjuicios causados por los aterrazados. CHAPARRO *et al.* 1993, por ejemplo, analizando aterrazados realizados hace más de veinte años en el sureste español, llegan a la conclusión de que este método de preparación del terreno no produce una evolución positiva del suelo, favorece la erosión hídrica en vez de frenarla, y provoca profundos cambios en la composición específica y en la estructura fisiológica de la vegetación natural. Esta situación ha llevado a que en algunas comunidades autónomas, como en Castilla y León, se haya planteado el abandono de esta técnica (MUÑOZ 2000).

Es ésta, por consiguiente, una preparación del suelo controvertida, con ventajas e inconvenientes derivados de su aplicación. No obstante, la bibliografía consultada permite establecer dos condiciones para que la preparación minimice los impactos negativos y cumpla con las funciones que se le encomiendan. Por un lado, se trata de reducir al máximo el movimiento de tierras y la remoción del suelo; y por otro, de ajustar el diseño a las necesidades del ecosistema, es decir: el dimensionado debe basarse en

la economía del agua (MARTÍNEZ DE AZAGRA & CALVO 1996).

De acuerdo con las condiciones expresadas, el objetivo de este trabajo es definir y evaluar el aterrazado en contrapendiente (o aterrazado de absorción) desde el punto de vista hidrológico, tratando de fijar unas pautas que sirvan para su buen diseño.

## MATERIAL Y MÉTODOS

Se ha estudiado una repoblación forestal situada dentro del término municipal de Reinoso de Cerrato (Palencia). La pendiente de la ladera es de un 40 %. La vegetación existente es fundamentalmente herbácea, con una cobertura media del 60 %, que crece sobre un litosuelo formado en unas margas yesosas bastante impermeables (Figura 2).

La intervención, efectuada en el otoño de 1988, consistió en unas terrazas anchas (de 3 m de explanación) según curvas de nivel, realizadas con un tractor de cadenas tipo "tiltdozer", con una contrapendiente del 5 %. Los desmontes han quedado con una pendiente del 120 %,

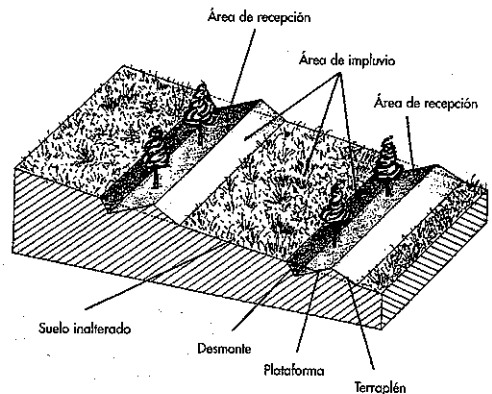


Figura 2. Ladera en la que se ha realizado un aterrazado con subsolado. Se identifican el área de impluvio y el área de recepción de la unidad sistematizada.

Figure 2. Two reverse-sloped terraces with their collecting and contributing areas.

mientras que los terraplenes poseen un 70 % de pendiente. El coeficiente de esponjamiento persistente, según GARCÍA SALMERÓN 1995, se cifra en 1,1. La densidad de plantación ha sido de 1.600 pies/ha, plantando dos líneas de pinos en cada terraza (una interior y otra exterior), distanciados entre sí 2 m y al tresbolillo (alternos, para reducir la competencia). No se plantó en la interterrasa, de por sí muy exigua.

En primer lugar y con la ayuda de un sencillo programa informático que hemos llamado TERRA1, caracterizamos la geometría de las terrazas. Posteriormente, evaluamos la sistematización del terreno planteada mediante el modelo hidrológico MODIPÉ (MARTÍNEZ DE AZAGRA 1996). Con el programa informático que desarrolla y aplica este modelo, se determina la idoneidad de crear trampas de agua, así como el efecto hídrico que produce el aterrazado, en comparación con la ladera inalterada.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Definición de la geometría de la terraza

La preparación del terreno que se analiza en este trabajo queda descrita por los siguientes datos estimados en campo:

- Anchura de la explanación (a): 3 m
- Ángulo del terreno ( $\lambda$ ): 40 %
- Ángulo del talud en terraplén ( $\tau$ ): 70 %
- Ángulo del talud en desmonte ( $\delta$ ): 120 %
- Ángulo de la contrapendiente de la explanación ( $\epsilon$ ): 5 %
- Coeficiente de esponjamiento ( $c_e$ ): 1,1

Con esta información puede ejecutarse el programa TERRA1, que nos aporta unas características geométricas más concretas del aterrazado ejecutado. Estas características se muestran en la Tabla 1 y quedan reflejadas en la Figura 3.

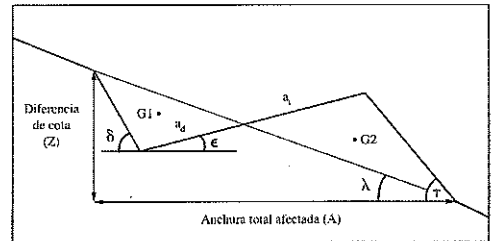


Figura 3. Esquema en el que destacamos las principales magnitudes geométricas de la preparación del suelo analizada.

Figure 3. Schematic view of a bench terrace showing the principal characteristics of its geometry.

Una vez obtenida esta información, pasamos a calcular la distancia horizontal entre los ejes de dos terrazas consecutivas ( $D$ ) y la longitud total de terrazas abiertas en 1 ha ( $L$ ). Siendo  $N$  la densidad de la repoblación (en pies/ha),  $n$  el número de líneas de plantación a incluir en cada plataforma y  $e$  la equidistancia entre plantas dentro de una línea, tenemos que:

$$e = \frac{n \cdot 10.000}{N \cdot D}$$

(si no se planta en la interterrasa, como es el caso).

A su vez:

Anchura de explanación en desmonte ( $a_1$ )	1,640 m
Anchura de explanación en terraplén ( $a_2$ )	1,360 m
Volumen de desmonte por unidad de longitud ( $V_d$ )	0,9433 m <sup>3</sup> /m
Volumen de terraplén por unidad de longitud ( $V_t$ )	1,0377 m <sup>3</sup> /m
Longitud de ladera desmontada ( $l_d$ )	2,757 m
Longitud de ladera terraplenada ( $l_t$ )	3,657 m
Longitud de ladera afectada ( $l$ )	6,414 m
Anchura total afectada ( $A$ )	5,955 m
Diferencia de cota afectada ( $Z$ )	2,382 m
Descenso del c.d.g. de la tierra removida ( $\Delta Z_G$ )	0,744 m
Sección mojada ( $S_m$ )	0,234 m <sup>2</sup>
Radio hidráulico ( $R_h$ )	0,0732 m

Tabla 1. Características geométricas del aterrazado, obtenidas mediante la utilización del programa TERRA1.

Table 1. Main geometrical characteristics of the terraces, obtained with TERRA1 programme.

$$D \cdot L = 10.000$$

En el caso que nos ocupa,  $N = 1.600$  pies/ha,  $n = 2$  y  $e = 2$  m. Con estos datos tenemos que:

$$D = \frac{n \cdot 10.000}{e \cdot N} = 6,25m$$

La longitud total de terraza abierta por hectárea vale:

$$L = \frac{10.000}{D} = 1.600m$$

El volumen desmontado asciende a 1.509 m<sup>3</sup>/ha (0,9433·1.600), lo que supone unas 3.020 toneladas desplazadas por hectárea. Este movimiento de tierras ha provocado un descenso en su cota de 74,4 cm, que lo debemos interpretar como erosión por preparación del terreno.

Haciendo coincidir la anchura total afectada (A) con la distancia horizontal entre terrazas (D) obtenemos la densidad máxima de repoblación posible mediante la preparación perfilada ( $N_{m\acute{a}x}$ ). Se tiene que:

$$D = A \Leftrightarrow N = N_{m\acute{a}x} = \frac{n \cdot 10.000}{e \cdot A}$$

Luego en nuestro caso:  $N_{m\acute{a}x} = 1.679$  pies/ha

Apreciamos que la densidad de plantación se aproximó mucho a la máxima posible (1.600 frente a 1.679 pies/ha), lo que tuvo una consecuencia inmediata en el porcentaje de superficie que salió indemne de la intervención (P).

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

Esta proporción es ciertamente escasa: La mayor parte de la superficie del suelo (el 95,28 %) se vió afectada con el aterrazado.

### Evaluación hidrológica de la preparación del suelo

1) Identificación de la unidad sistematizada (datos geométricos).

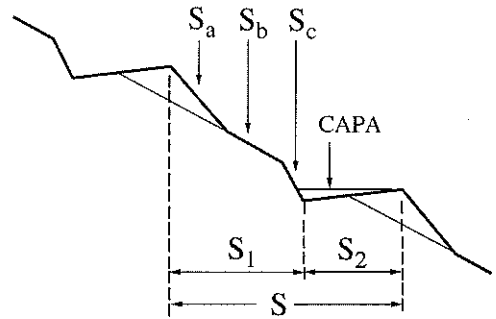


Figura 4. Datos geométricos de la unidad sistematizada.  
Figure 4. Geometric data of the systematized unit.

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

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

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

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  $\epsilon$  el ángulo de la contrapendiente (5 %, que corresponde a 2,862°).

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

Por otra parte, el área de impluvio consta de tres superficies con características hidrológicas bien diferentes (razón por la que conviene individualizarlas) y que son: terraplén ( $S_a$ ), terreno inalterado ( $S_b$ ) y desmonte ( $S_c$ ). Véanse las figuras 3 y 4.

$$S_1 = S_a + S_b + S_c$$

Para calcular estas superficies valen las siguientes relaciones:

$$S_a = (\text{longitud ladera terraplénada}) \cdot \cos \lambda - (\text{anchura explanación en terraplén}) \cdot \cos \epsilon$$

$$S_b = D - A$$

$$S_c = (\text{longitud ladera desmontada}) \cdot \cos \lambda - (\text{anchura explanación en desmonte}) \cdot \cos \epsilon$$

Lo que aplicado a nuestro caso, resulta:

$$S_a = 2,037 \text{ m}^2 \quad S_b = 0,295 \text{ m}^2 \quad S_c = 0,922 \text{ m}^2$$

$$S_1 = S_a + S_b + S_c = 3,254 \text{ m}^2$$

Finalmente, debemos estimar el tamaño de la trampa de agua creada:

$$CAPA = \textit{sección mojada} \cdot 1 = 0,234 \text{ m}^3 = 234 \text{ litros}$$

2) Datos hidrológicos

Como datos de entrada, el modelo hidrológico MODIPÉ (MARTÍNEZ DE AZAGRA 1996) precisa el número de curva de la ladera actual (NAC), el del área de impluvio (NI) y el del área de recepción (NR). Estos números de curva se determinan utilizando las conocidas tablas del Servicio de Conservación de Suelos estadounidense que figuran en cualquier tratado de Hidrología.

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.

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 espon-

jado) 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:

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

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.

3) Aplicación del modelo MODIPÉ.

El modelo MODIPÉ, tras introducir los datos requeridos (números de curva, capacidad de la trampa de agua y superficies de las áreas de impluvio y recepción), ofrece un análisis comparativo entre los números de curva. La salida gráfica del programa se muestra en la Figura 5. El modelo recomienda la creación de trampas de agua, en base a las relaciones existentes entre los números de curva.

La modelización del comportamiento hídrico de la preparación del suelo estudiada, se completa con los umbrales de escorrentía de la ladera actual y de la unidad sistematizada (Tabla 2).

De acuerdo con los resultados obtenidos, se aprecia que estamos ante un ecosistema degradado, con una baja capacidad de acogida de agua debido a sus elevados números de curva.

Tabla 2. Datos de la sistematización del terreno según el programa MODIPÉ.

Table 2. Hydrological data of the systematized slope according to MODIPÉ programme.

	S (m <sup>2</sup> )	NI	PO (1) (mm)	N2	PO(2) (mm)	N3	PO(3) (mm)
Ladera actual	-	69	23	84	10	92	4
Área de impluvio	3,3	78	14	89	6	95	3
Área de recepción	3,0	74	18	87	8	94	3
Unidad sistematizada	6,3	35	93	44	66	50	52

Capacidad de embalse del área de recepción = 234,0 l

S = superficie; N(i) = número de curva en condición de humedad i; PO(i) = umbral de escorrentía en condición de humedad i.

Sus umbrales de escorrentía así lo atestiguan: con que lluevan 10 mm en unas condiciones medias de humedad en la ladera se produce escorrentía. Si llueve sobre mojado (condición III de humedad), el umbral se reduce a 4 mm. Sobre suelo bien seco (condición I) la escorrentía superficial comienza con aguaceros superiores a 23 mm. Esta circunstancia puede propiciar una sequedad en la zona que no concuerda con la pluviometría del lugar. La situación se agrava si, como es característico del 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 (=desertización).

Con la sistematización del terreno, el comportamiento hidrológico de la ladera cambia sustancialmente. Los umbrales de escorrentía se elevan. Para la unidad sistematizada pasan a valer 93 mm en suelo seco, 66 mm en condiciones medias y 52 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.

Lo que demuestran los datos hasta ahora presentados es que ésta es una buena preparación del terreno, desde el punto de vista de las cosechas de agua. Sin embargo, las trampas de agua son demasiado grandes para el tamaño de la microcuenca: 6,25 m<sup>2</sup> de microcuenca para 234 l de trampa de agua. El modelo MODIPÉ permite afirmar que hubiera bastado con una trampa de agua de 103 litros (lo que supone una altura de muretes de unos 34 cm) para lograr endorreísmo ante una precipitación de diseño de 40 mm (aguacero que posee un periodo de retorno de 30 años en la zona de estudio).

Pero, como decimos, no es el efecto hídrico directo lo que debe cuestionarse, ya que efectivamente se reduce la escorrentía y se incrementa la capacidad de acumulación de agua. Los problemas se plantean porque la preparación del suelo llevada a cabo afecta a la mayor parte de la superficie de la ladera (al 95,28 %) y remueve un gran volumen de tierra. Ésto implica, además del notable impacto paisajístico de la nueva topografía en graderío, la eliminación excesiva e injustificada de la vegetación preexistente, la posible formación de tasanás que dificulten la infiltración (al quedar mucho tiempo al desnudo el suelo removido), el riesgo de deslizamientos en masa en épocas de lluvia (porque los ángulos del desmonte y terraplén son excesivos, según GARCÍA SALMERÓN 1995), el peligro de erosión hídrica

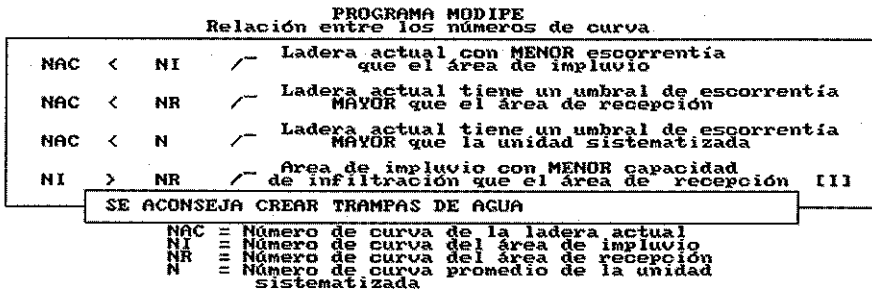


Figura 5. Salida gráfica del programa MODIPÉ, en el que se comparan los números de curva de la ladera actual, del área de impluvio y del área de recepción.

Figure 5. Graphic output of MODIPÉ programme comparing the curve numbers of the degraded slope, the contributing areas and the collecting areas.

por regueros y formación de cárcavas al concentrarse la escorrentía en determinados puntos, y la interrupción drástica de la evolución edáfica natural.

En consecuencia, el aterrazado con subsolado es una actuación que genera efectos hidrológi-

cos positivos para el establecimiento de vegetación. No obstante, su diseño debe estar basado en criterios dictados por la economía del agua, para reducir al mínimo indispensable el movimiento de tierras y la remoción del suelo y, consecuentemente, los impactos que estos trabajos producen.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHAPARRO, J., ENRÍQUEZ, G. L. & ESTEVE, M.A. 1993. Consecuencias ecológicas de las repoblaciones forestales mediante aterrazamientos en ambientes áridos y semiáridos (Murcia, SE de España). *Actas Congreso Forestal Español IV*: 163-168.
- GARCÍA SALMERÓN, J. 1995. *Manual de Repoblaciones Forestales II*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Fundación Conde del Valle de Salazar. Madrid.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA PAREDES, A. 1996. Diseño de sistemas de recolección de agua para la repoblación forestal. Mundiprensa. Madrid.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA PAREDES, A. 1998. Desarrollo de un modelo sobre recolección de agua aplicable a la restauración forestal. *Ecología* 12: 93-104
- MARTÍNEZ DE AZAGRA, A. & CALVO, M. 1996. Desertización por aridez edáfica. *Actas I Congreso Regional del Agua (Valladolid)*: 111-117.
- MUÑOZ, J.F. (Dir.). 2000. Plan Forestal de Castilla y León. Junta de Castilla y León (Consejería de Medio Ambiente).
- PEMÁN, J. & NAVARRO, R. 1998. *Repoblaciones forestales*. Edicions de la Universitat de Lleida.
- SERRADA, R. 1993. *Apuntes de repoblaciones forestales*. Fundación Conde del Valle de Salazar. Madrid.