

LA ESCORRENTÍA NATURAL EN LA ZONA ORIENTAL DE MONEGROS. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE UN PROGRAMA DE BALANCE DIARIO DE AGUA EN EL SUELO¹

José Ángel SÁNCHEZ NAVARRO²
Eduardo GARRIDO SCHNEIDER³
José Luis DE MIGUEL CABEZA²
Juan Carlos JORGE ULECIA⁴

RESUMEN.—Se ha empleado un programa de ordenador para evaluar la escorrentía natural en la zona oriental de Monegros, el cual realiza el balance diario de agua en el suelo. La escorrentía ha sido evaluada en los cursos de agua más importantes, realizando el balance hídrico (precipitación, ETP, ETR, déficit y escorrentía) para tres tipos diferentes de suelos. Considerando la superficie ocupada por los tres tipos de suelos, se ha podido evaluar la escorrentía total general en la zona oriental de Monegros.

ABSTRACT.—It is employed a computer program in order to evaluate natural runoff in East Monegros zone, it calculates a day to day balance in soils. Streamflow is evaluated in the most important water courses and it is made a water balance (rain, potential and actual evapotranspiration, deficit,

¹ Este trabajo forma parte del realizado por J. Á. SÁNCHEZ y E. GARRIDO (1989), financiado en parte mediante una ayuda del I.E.A.

² Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza. E-50009 ZARAGOZA.

³ I. T. G. E. C/ Fernando el Católico, 59-4^ºC. E-50006 ZARAGOZA.

⁴ Departamento de Matemáticas Aplicadas. Facultad de Ciencias. Universidad de Zaragoza. E-50009 ZARAGOZA.

runoff) for three different types of soil. The global balance for the whole East Monegros zone is made by considering the area of those soil types.

KEY WORDS.—Runoff, infiltration, water-balance, soils, Monegros-Spain.

INTRODUCCIÓN

Para la evaluación de recursos hídricos es muy frecuente la utilización de métodos como el balance de agua en el suelo, empleando para ello valores mensuales medios de precipitación y de evapotranspiración potencial (ETP). La aplicación de este balance en climas como el del valle del Ebro lleva en ocasiones a resultados en evidente contradicción con la realidad (no hay excedentes y por tanto no existe escorrentía).

Una aproximación mayor al proceso generador de la escorrentía se obtiene si se utilizan valores diarios de precipitación y si el balance de agua en el suelo se hace día a día. Es este tipo de balance el que se ha aplicado al sector oriental de Monegros, los valores de escorrentía obtenidos pueden ser de utilidad para el diseño de drenajes, y los déficits resultantes pueden ser indicativos de los volúmenes de agua de riego que en las transformaciones actualmente en realización deberán aplicarse.

METODOLOGÍA

El programa de balance diario de agua en el suelo "BALANDIR" corresponde a una versión modificada del utilizado por la Junta de Aguas de Cataluña. El programa ha sido compilado en FORTRAN-77 e implementado en un DIGITAL VAX-VMS de la Universidad de Zaragoza.

El programa realiza día a día el siguiente balance:

$$\text{SALIDAS} = \text{ENTRADAS} \pm \text{VARIACIÓN DEL ALMACENAMIENTO EN EL SUELO}$$

Para ello, evalúa de forma iterativa la expresión $R = (R + P) - E$ con las condiciones siguientes:

Si $R > C \rightarrow I$

Si $R > O \rightarrow D$

Si $P > P_{\emptyset} \rightarrow P = P_{\emptyset}$ y $ES = P - P_{\emptyset}$

donde cada término representa:

C=Capacidad de campo.

R=Reserva de agua.

P=Pluviometría.

E=Evapotranspiración.

D=Déficit.

ES=Escorrentía superficial.

I=Infiltración (escorrentía subterránea).

P_{\emptyset} =Cantidad de precipitación diaria a partir de la cual toda el agua constituye escorrentía directa.

La explicación de cada uno de los conceptos y la forma de obtenerse es la siguiente:

Capacidad de campo. Es el volumen máximo de retención de agua en un suelo; cuando la cantidad de agua supera ese valor se inicia su infiltración hacia la zona saturada y por tanto comienza la escorrentía subterránea. La capacidad de campo es un dato que se aporta al programa según criterio del usuario, variando en función las características del terreno.

Reserva. En el programa es la variable que recoge el resultado del balance, requiere de un valor inicial que debe definir el usuario. El valor inicial, puede oscilar entre capacidad de campo, o cero; a veces se utiliza un valor medio de los dos.

Pluviometría. Es la información básica para el cálculo del programa. Como el balance se hace diariamente es necesario aportar al ordenador la lluvia diaria de todo el período de tiempo que se va a considerar. Para la introducción de los datos se ha realizado un programa que facilita la generación del correspondiente fichero.

Evapotranspiración. Es el volumen de agua que demanda la atmósfera y las plantas. El proceso calcula una evapotranspiración potencial (ETP) para cada mes del año, que posteriormente divide por el número de días

del mes, para obtener un ETP teórica diaria –para cada mes– que es la utilizada por el programa Para hacer el cálculo de la ETP se utiliza el método de THORNWAITE que responde a la fórmula siguiente:

$$ETP = [(N \cdot d) / 360] \times E,$$

siendo:

N=Número máximo de horas de sol (valor que se encuentra tabulado en función de la latitud y mes considerado).

d=Número de días que tiene el mes.

$$E=16 \times [10 \times t] / I \text{ a}$$

donde:

K=Temperatura media diaria del mes.

$$I=\sum(t/5)^{1.514}$$

siendo I=Índice de calor anual.

$$a=[675 \times I^3 \times 10^{-9}] - [771 \times I^2 \times 10^{-7}] + [1792 \times I \times 10^{-5}] + 0,49239$$

Para el cálculo de la ETP el único dato que ha de aportarse al ordenador es el de la temperatura media mensual, ya que el resto de los coeficientes y tablas se encuentran incorporados en el programa.

Déficit. La diferencia que existe entre la demanda de agua de la atmósfera y las planta (ETP) y la que realmente puede aportar el suelo a nivel diario (evapotranspiración real) constituye un resultado del balance; si éste resultado es negativo se dice que existe déficit –falta de agua–. El déficit diario se acumula para dar el déficit mensual y anual.

Infiltración. Superado el valor de capacidad de campo, el agua se infiltra hacia la zona saturada constituyendo la escorrentía subterránea. Este valor lo calcula el programa, y la suma de los valores diarios permite conocer la infiltración mensual y anual.

Escorrentía directa. Se obtiene a nivel diario a partir de un valor de precipitación P_{ϕ} ; este valor, depende de las características del terreno, litología, pendiente, cubierta vegetal, etc. y hace que sin completar la capacidad de campo del suelo, el agua fluya en superficie. El valor a partir del cual se inicia la escorrentía superficial viene definido por el usuario.

LOS INPUT DEL PROGRAMA

Las entradas requeridas por el programa son, como hemos visto, de tipo meteorológico (precipitación diaria y temperaturas medias mensuales) e hidroedafológico (capacidad de campo y precipitación diaria a partir del cual toda el agua que reciba el suelo se pierde por escorrentía directa y por tanto escapa al balance de agua en el suelo).

En el trabajo realizado se han utilizado los datos del observatorio de Peñalba, que se ubica en la parte central de la zona considerada y dispone de un periodo de medidas ininterrumpido de 15 años (1973-1987). El valor medio anual de la serie es de 299 mm y los valores registrados son los siguientes:

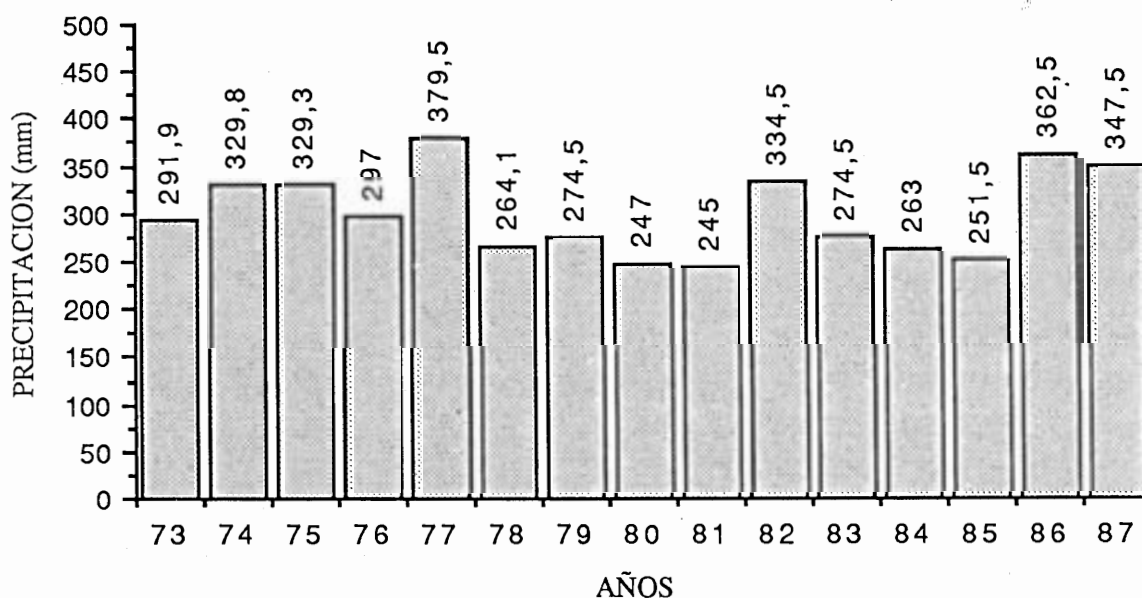


Fig. 1. Precipitaciones anuales registradas en Peñalba en el período 1973-1987.

Las precipitaciones medias mensuales siguen un régimen típicamente mediterráneo continentalizado; no obstante, los valores registrados a lo largo de los años difieren ostensiblemente de la distribución media mensual.

Los valores de temperatura utilizados corresponden también al observatorio de Peñalba, pero al no disponer de temperaturas mensuales de

todos los años simulados, en algunos de ellos se han empleado valores medios.

La capacidad de campo y la precipitación diaria causante de escorrentía directa se han definido a partir de análisis granulométricos de suelos (M.A.P.A., 1978), de observaciones topográficas y geomorfológicas, de la litología aflorante, y de los coeficientes de permeabilidad y porosidad efectiva estimados mediante los ábacos de Bredding (BREDDING, 1963).

Se han definido tres tipologías hidroedafológicas:

- Terrenos de Tipo 1 o “de cultivo”: Corresponden a suelos de cultivo bien desarrollados, de poca o muy poca pendiente, normalmente ocupados por cultivos de secano, y donde, ocasionalmente, existen áreas deprimidas encharcadas y salinas. La capacidad de campo utilizada ha sido de 30 mm y el de precipitación diaria causante de escorrentía directa es de 15 mm.
- Terrenos de Tipo 2 o “de glacis”: Corresponden a suelos poco desarrollados sobre materiales detríticos gruesos en zonas elevadas, de muy poca pendiente y con morfología de glacis. La capacidad de campo utilizada ha sido de tan sólo 10 mm debido al pequeño desarrollo del suelo y su escasa capacidad de retención (elevada permeabilidad). Por la disposición horizontal de estos suelos y su elevada permeabilidad la escorrentía directa sólo se considera iniciada para precipitaciones diarias superiores a los 25 mm.
- Terrenos de Tipo 3 o “de pendiente”: Corresponden a superficies con suelo poco desarrollado o ausente, generalmente con pendientes elevadas relacionadas con escarpes y barrancos. Con estas características se considera una capacidad de campo de tan sólo 10 mm y una escorrentía directa que, debido a lo elevado de la pendiente del terreno, se genera para valores de precipitación superiores a 10 mm/día.

RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados del programa BALANDIR son el balance diario de agua en el suelo para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 1974

y el 31 de diciembre de 1987, generando tres listados diferentes: infiltración, déficit y escorrentía superficial (ver anexo). La suma de los valores diarios permite obtener su correspondiente mensual; al final de cada año, aparece un resumen del balance anual que incluye el estado de la reserva inicial y final, junto con los valores anuales de precipitación, escorrentía superficial, infiltración y déficit.

El programa se ha aplicado a los tres tipos hidroedafológicos definidos anteriormente, obteniendo los resultados que se muestran a continuación.

Balance hídrico en terrenos de Tipo 1

Para esta tipología el tratamiento estadístico descriptivo de los resultados ha dado los siguientes valores⁵ expresados en mm/año:

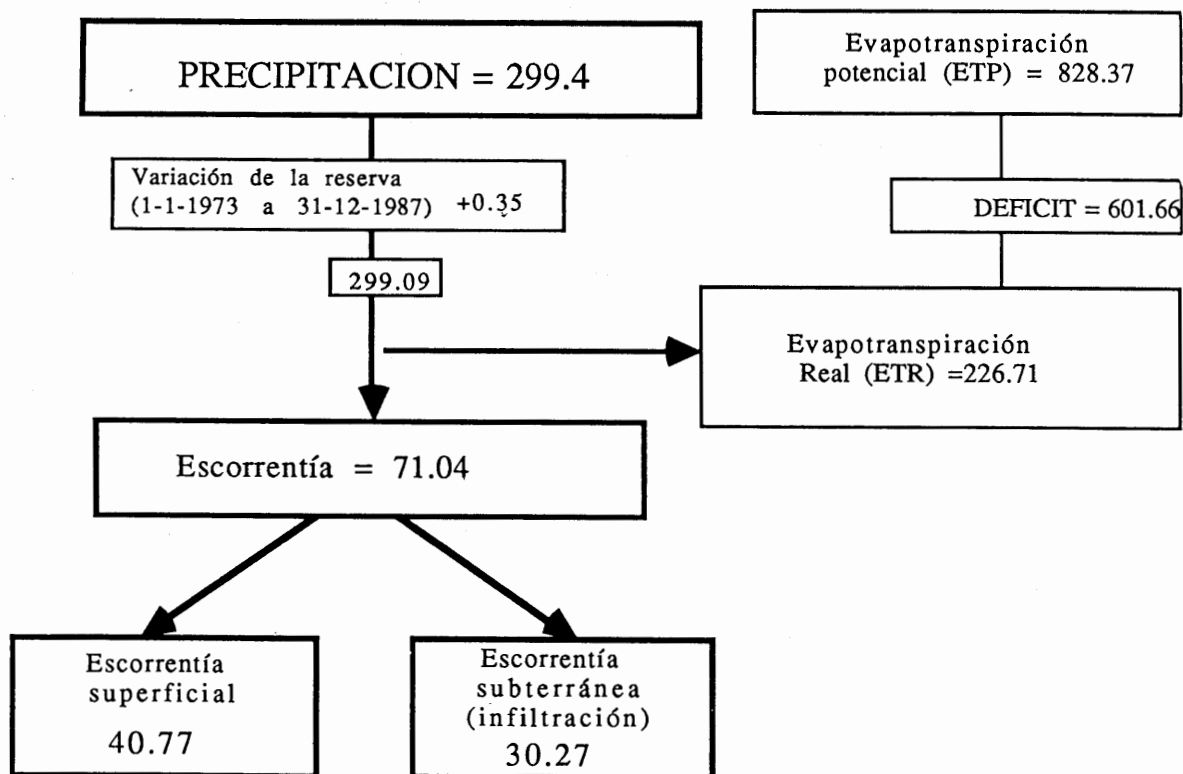
	MEDIA	DESVIACIÓN	C.V.%	MÁX.	MÍN.	P50%
ETR	226.7	41.3	18.2	305.5	174.3	214.8
DÉFICIT	601.6	48.3	8.0	699.9	544.5	609.5
INFILTRACIÓN	30.2	27.3	90.2	83.2	0.0	27.6
ESCORRENTÍA SUPERFICIAL	40.7	22.7	55.7	78.5	9.0	40.0

Estos terrenos son los que menor escorrentía total generan de todas las tipologías consideradas. La variación interanual que existe en el volumen de agua infiltrada es muy elevada (ha variado entre 0 y 83 mm), mientras que el déficit y la ETR muestran variaciones poco significativas de un año a otro.

Debemos resaltar cómo en estos terrenos la ETR media registrada es superior a la de otras tipologías hidroedafológicas y su déficit menor. El agua es mejor aprovechada por las plantas debido a la mayor capacidad de almacenamiento de agua en el suelo.

Esquemáticamente el balance de agua en estos terrenos sería el siguiente:

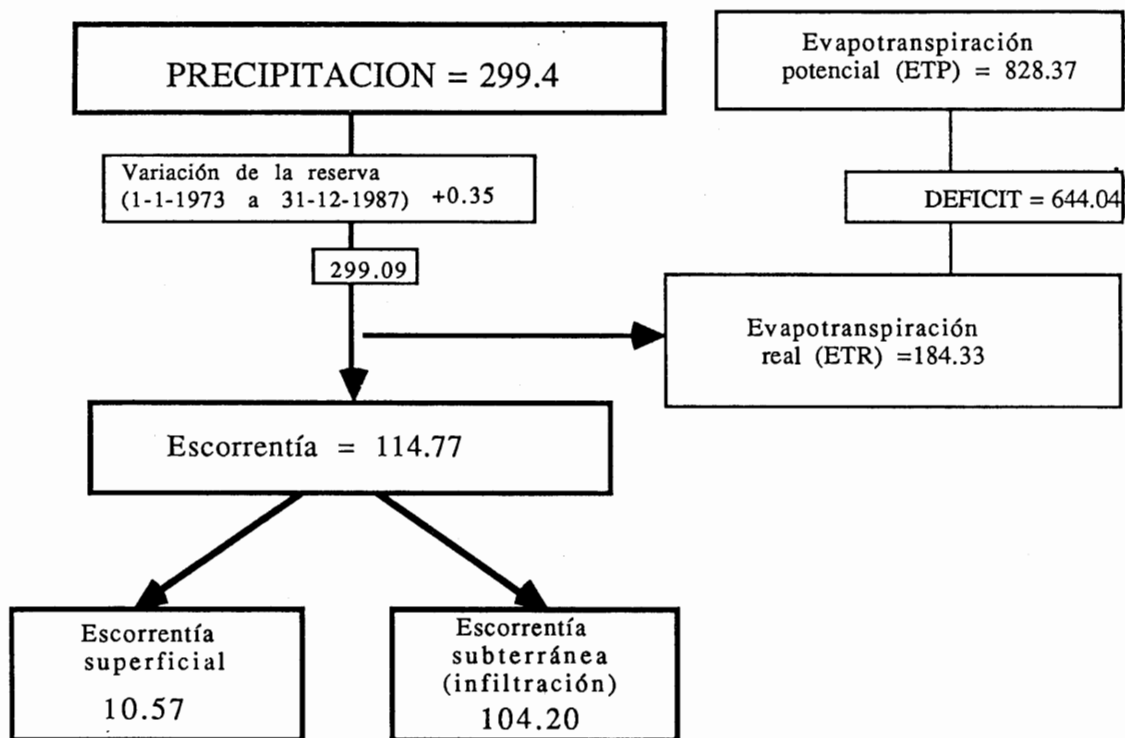
⁵ Los valores de la tabla corresponden a la media, desviación típica, coeficiente de variación, valores máximos y mínimos de la serie analizada y percentilo correspondiente al 50%.



Balance hídrico en terrenos de Tipo 2

Para esta tipología se obtiene una escorrentía total media de 114,5 mm destacando el elevado volumen de agua infiltrada (104 mm) frente al de escorrentía superficial, fenómeno debido a las condiciones hidroedafológicas de estos terrenos (bajo volumen de almacenamiento y elevada capacidad de percolación). Los resultados estadísticos obtenidos son los siguientes:

	MEDIA	DESVIACIÓN	C.V.%	MÁX.	MÍN.	P50%
ETR	184.0	37.5	20.1	250.0	139.2	181.0
DÉFICIT	644.0	43.0	6.6	733.7	583.3	643.4
INFILTRACIÓN	104.0	36.1	34.7	190.0	49.4	95.6
ESCORRENTÍA SUPERFICIAL	10.5	11.2	106.9	38.0	0.0	6.0



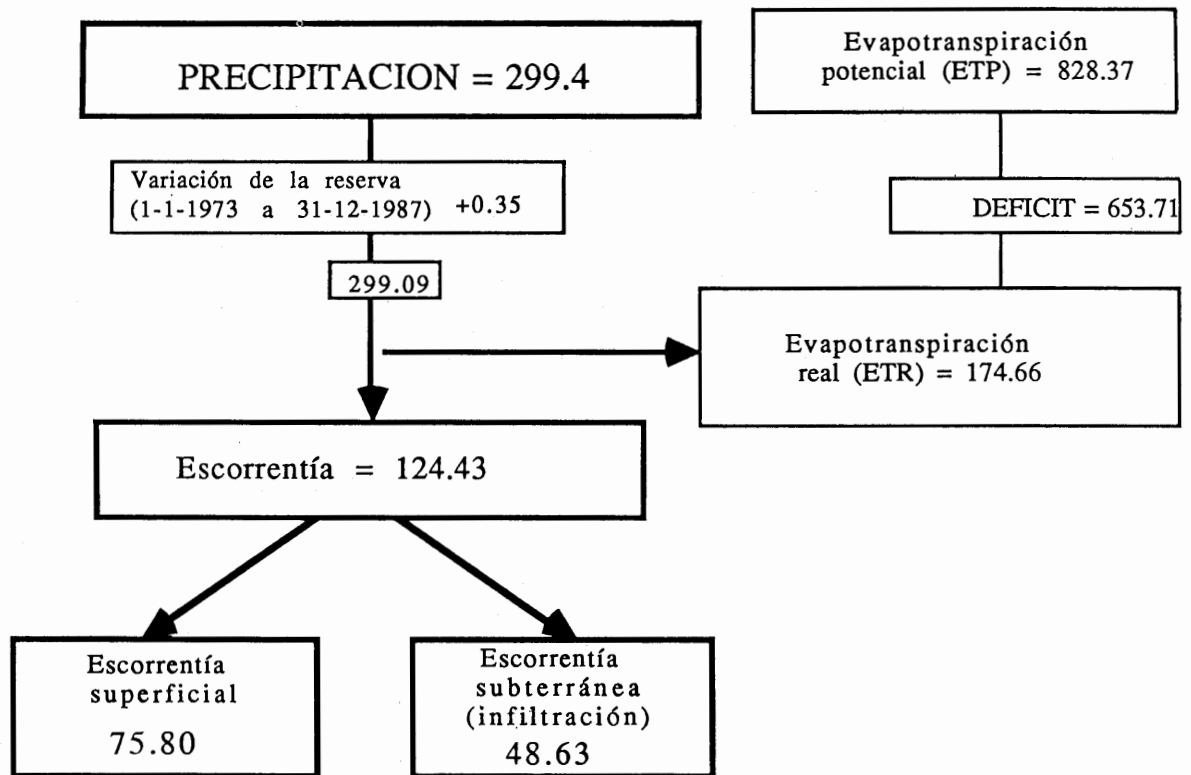
Balance hídrico en terrenos de Tipo 3

En estos terrenos se alcanza la escorrentía total más alta de todas las obtenidas. Dos son las causas determinantes de este fenómeno: por una parte, un suelo de desarrollo escaso o nulo que tan sólo puede almacenar un volumen muy reducido de agua, y, por otra, la elevada pendiente del terreno.

Los resultados estadísticos obtenidos son los siguientes:

	MEDIA	DESVIACIÓN	C.V.%	MÁX.	MÍN.	P50%
ETR	174.6	35.3	20.2	236.3	130.8	172.7
DÉFICIT	653.7	42.2	6.4	746.7	594.0	651.7
INFILTRACIÓN	48.6	6.7	53.9	94.3	12.1	50.7
ESCORRENTÍA SUPERFICIAL	75.8	30.5	40.3	118.7	36.5	71.0

Esquemáticamente el balance de agua en estos terrenos sería el siguiente:



En este tipo de terrenos se genera un importante volumen de escorrentía directa que es canalizada mediante una densa red de drenaje, muy activa y con evidentes fenómenos erosivos. Consecuentemente, se producen bajos valores de ETR y un alto déficit.

LA ESCORRENTÍA EN MONEGROS

Para la evaluación de la escorrentía de este sector de Monegros, su superficie se ha dividido en 7 dominios hidrográficos. La extensión de cada uno de ellos y la superficie ocupada por las tres tipologías de suelos antes definidas es la siguiente:

Dominio hidrográfico	TOTAL	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3
Arroyo de Bensola	134	109	17	8
Val de Liberola	232	195	17	20
Barrancos Cinca-Segre	102	18	0	84
Arroyo de la Valcuerna	322	223	0	99
Barrancos del Ebro	119	31	0	88
Las Lagunas	33	33	0	0
Barrancos del Alcanadre	158	90	13	55
TOTAL (valores en Km²)	1.100	699	47	354

Aplicando los resultados del balance de agua en cada tipo de terreno se obtiene la escorrentía de los dominios hidrográficos definidos:

Dominio hidrográfico	(1)	(2)	(3)	(4)
Arroyo de Bensola	10,88	81,19	27,12	2,575
Val de Liberola	18,63	80,30	26,82	2,546
Barrancos Cinca-Segre	11,79	115,59	38,61	3,665
Arroyo de la Valcuerna	28,57	88,73	29,63	2,814
Barrancos del Ebro	13,04	109,58	36,80	3,475
Las Lagunas	2,35	71,21	23,91	2,258
Barrancos del Alcanadre	14,63	92,59	31,10	2,936
TOTAL	99,89	90,81	30,38	2,880

(1) Escorrentía total en $\text{hm}^3/\text{año}$.

(2) Precipitación eficaz en $\text{mm}/\text{año}$.

(3) Coeficiente de escorrentía en %.

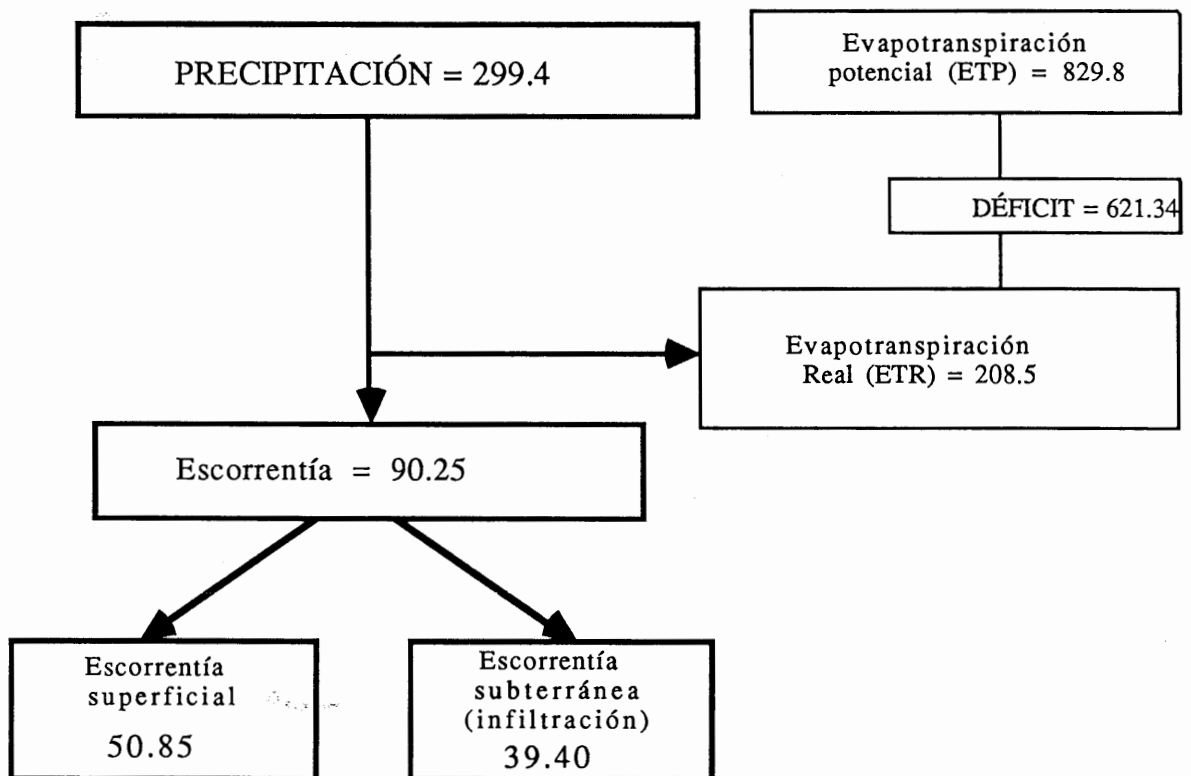
(4) Caudal específico en $\text{l}/\text{sg} \times \text{km}^2$.

Como puede observarse, la mayor aportación corresponde al arroyo de la Valcuerna, que es el que más superficie tiene. Las aportaciones específicas más destacables se dan en los dominios hidrográficos cuyo terreno predominante es el de tipo 3 (barrancos vertientes al Ebro, Cinca y Alcanadre), es principalmente escorrentía directa producida durante las precipitaciones intensas. Especial interés tiene desglosar en cada dominio la escorrentía total en los dos componentes que determina el balance: escorrentía directa e infiltración:

Dominio hidrográfico	Escorrentía directa	Infiltración
Arroyo de Bensola	5,23	5,46
Val de Liberola	9,65	8,65
Barrancos Cinca-Segre	7,10	4,63
Arroyo de la Valcuerna	16,60	11,56
Barrancos del Ebro	7,93	5,22
Las Lagunas	1,35	1,00
Barrancos del Alcanadre	7,98	6,75
TOTAL (valores en $\text{hm}^3/\text{año}$)	55,84	43,27

El volumen medio anual de escorrentía generado en este sector oriental de Monegros es por tanto de casi $100 \text{ hm}^3/\text{año}$ (99,89), de los que

55,84 son de escorrentía directa y 43,27 de infiltración. Estos valores suponen un coeficiente de escorrentía del 30,4 % y un caudal específico de 2,8 l/sg x km². Transformados los valores a mm (o l/m²) el balance global de Monegros queda expresado en el esquema siguiente:



En cuanto a la distribución de las escorrentías –superficial y subterránea– a lo largo de los meses, se dispone de una relación completa de valores (15 años seguidos) en los listados de ordenador obtenidos de la aplicación del programa.

Para mostrar la distribución mensual se han ido acumulando en cada mes las escorrentías producidas en los 15 años, obteniendo así los gráficos de las figuras 2 y 3.

La escorrentía directa es especialmente abundante en mayo y noviembre, teniendo entre los meses de marzo a octubre (excepto julio) valores muy similares. Destaca también la elevada irregularidad que existe de unos años a otros; así, en marzo, la escorrentía superficial producida en el año 1974 (50 mm) supone casi el 90% de la obtenida en 15 años (55 mm). Este hecho, de forma menos acusada, se aprecia en todos los meses.

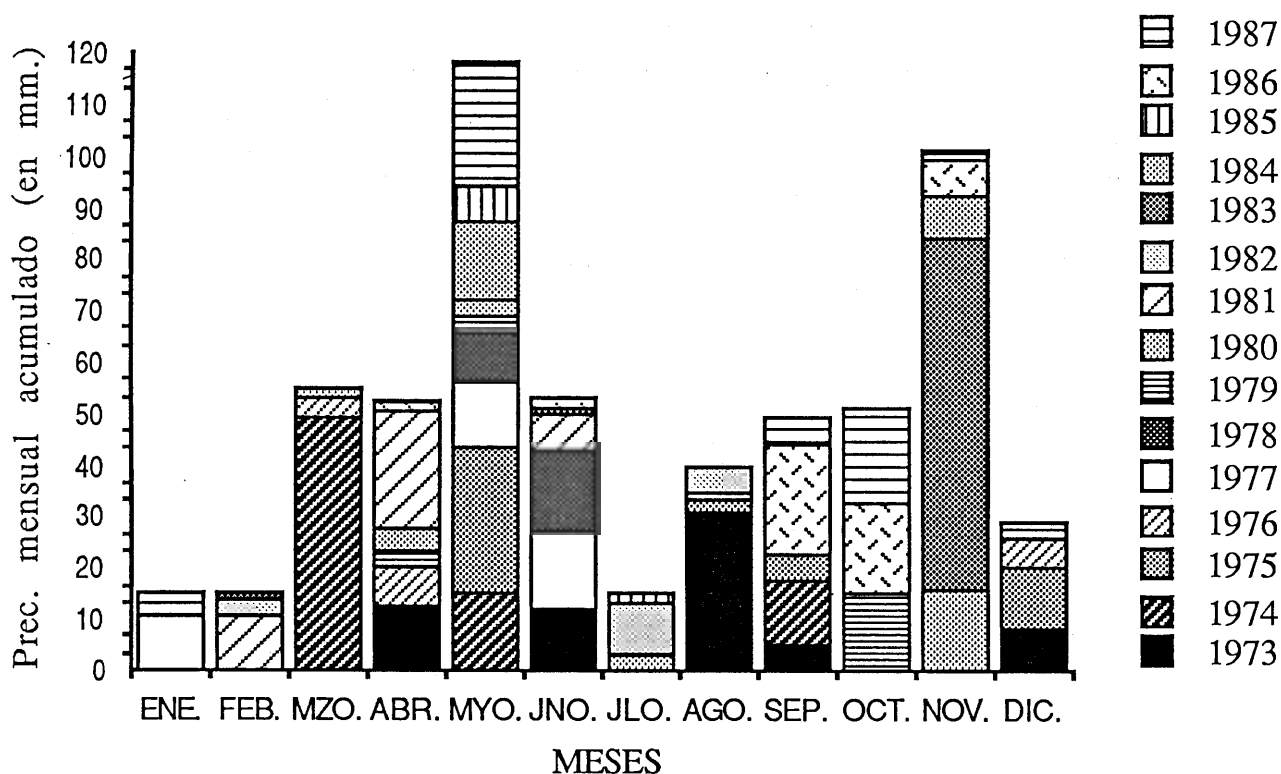


Fig. 2. Escorrentía mensual directa acumulada en el período simulado.

Puede observarse también cómo son numerosos los años en que uno o varios meses no presentan escorrentía.

La figura 3 representa las escorrentías subterráneas (infiltración) mensuales; la distribución que presentan difiere notablemente de la obtenida para la escorrentía superficial. Se observa cómo la práctica totalidad de la infiltración se produce en los meses de diciembre a marzo, siendo en los meses de primavera y verano la recarga de la zona saturada prácticamente nula.

Esta distribución es una consecuencia de la evapotranspiración que se produce en el suelo y tiene un especial interés para estimar la evolución de la superficie freática en condiciones naturales.

Si los valores representados en las gráficas se dividen por los 15 años considerados, se obtienen los valores medios mensuales, tanto de infiltración como de escorrentía directa, y sumando ambos, se tiene la escorren-

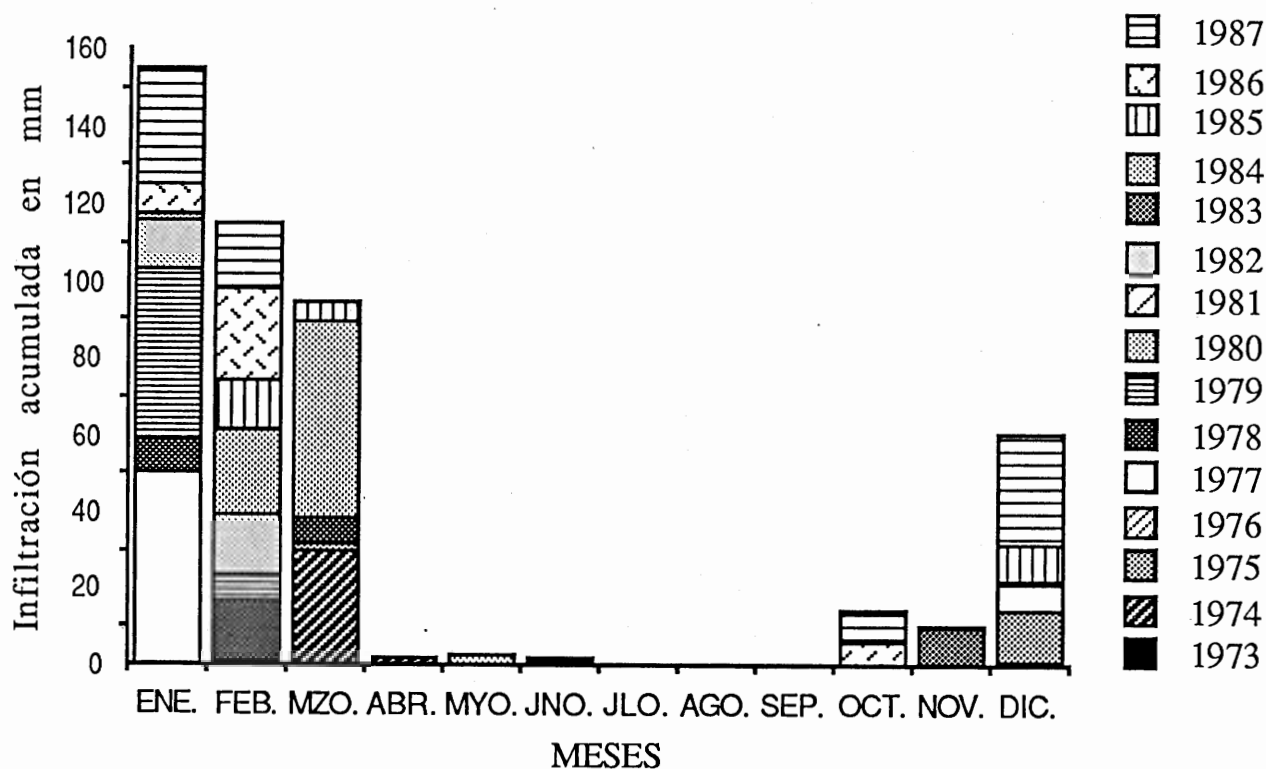


Fig. 3. Infiltración mensual acumulada en el período simulado.

tía total (figura 4). En esta figura se aprecia cómo la escorrentía total es máxima en invierno, existiendo otros máximos secundarios en mayo y noviembre. La infiltración se concentra en los meses invernales, mientras que la escorrentía directa es posible en cualquier mes, aunque alcanza su máximo en los citados meses de mayo y noviembre.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La aplicación del programa de balance diarios de agua en el suelo permite una mayor aproximación al fenómeno real, obteniendo unos valores de escorrentía, superficial y subterránea, que difieren ostensiblemente de los obtenidos por otros métodos (balances mensuales, anuales,...).

Sin duda el factor más decisivo para la correcta aplicación de estos balances diarios se encuentra en la estimación de los parámetros iniciales, en especial los hidroedafológicos (capacidad de campo, precipitación a partir de la cual se inicia la escorrentía directa). La correcta valoración de

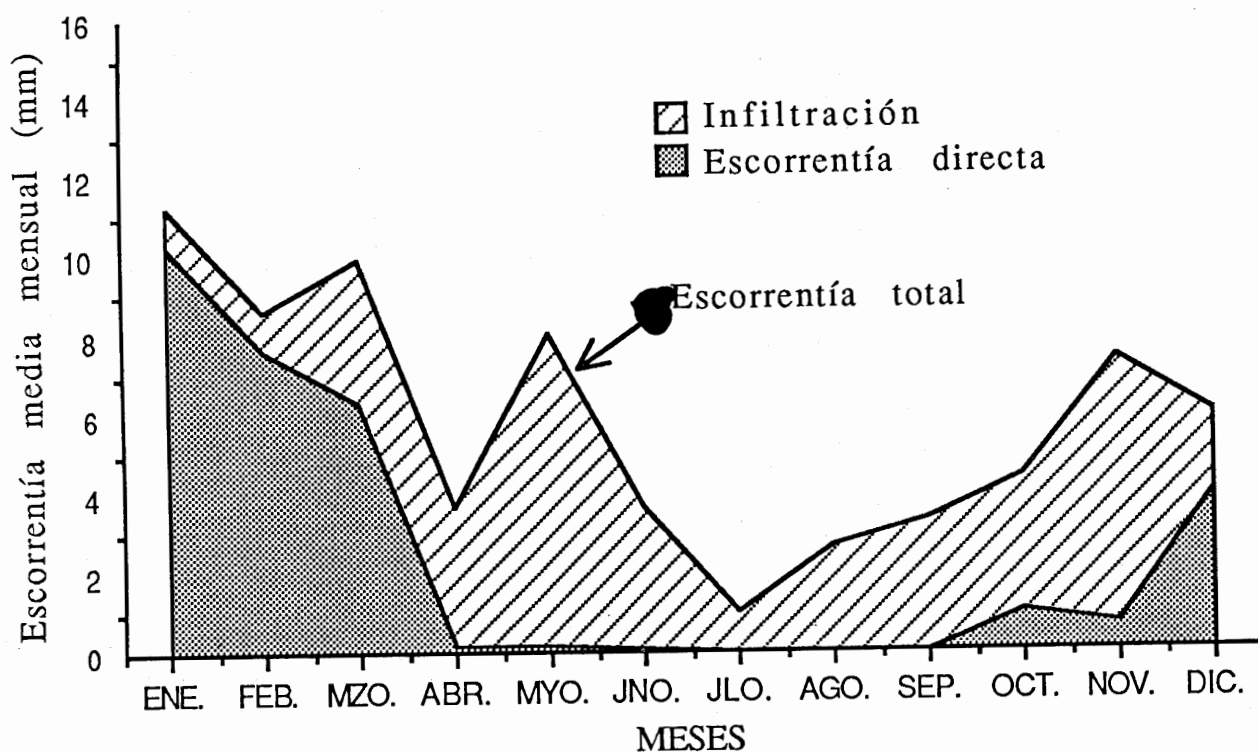


Fig. 4. Escorrentía media mensual, desglosada en directa y subterránea.

esos parámetros requiere de la utilización de métodos experimentales de campo. No obstante, por la facilidad de utilización del programa, su uso iterativo con distintos parámetros hidroedafológicos puede aproximar muy bien los resultados a los reales de la zona.

BIBLIOGRAFÍA

- BREDDIN, H. (1963). Die Grundrißkarten des Hydrogeologischen Kartenwerkes der Wasserwirtschaftsverwaltung von Nordrhein-Westfalen. *Geologische Mitteilungen*, vol. 2, n.º 4, octubre (1963), pp. 393-416, Aachen.
- MARTÍNEZ GIL, F.J. *et al.* (1988). *Evaluación preliminar del impacto ambiental de los regadíos en el polígono Monegros II (Estudio Hidrológico)*. Dirección General del Medio Ambiente, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 88 págs., 4 planos y anexos.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA (1976). *Caracterización agroclimática de la provincia de Huesca*. Dirección General de la Producción Agraria, 39 pp., anexos y plano.

- MINISTERIO DE AGRICULTURA (1978). *Mapa de clases agrológicas*. E: 1: 50.000. Hoja de Peñalba (386).
- MINISTERIO DE AGRICULTURA (1988). *Mapa de clases agrológicas*. E: 1: 50.000. Hoja de Fraga (387).
- MINISTERIO DE AGRICULTURA (1978). *Mapa de clases agrológicas*. E: 1: 50.000. Hoja de Bujaraloz (314).
- MINISTERIO DE AGRICULTURA (1978). *Mapa de clases agrológicas*. E: 1: 50.000. Hoja de Mequinenza (415).
- MINISTERIO DE AGRICULTURA (1978). *Mapas de cultivo y aprovechamiento*. E: 1: 50.000. Hoja de Peñalba (368).
- MINISTERIO DE AGRICULTURA (1978). *Mapas de cultivo y aprovechamiento*. E: 1: 50.000. Hoja de Fraga (387)
- MINISTERIO DE AGRICULTURA (1978). *Mapas de cultivo y aprovechamiento*. E: 1: 50.000. Hoja de Bujaraloz (314).
- MINISTERIO DE AGRICULTURA (1987). *Caracterización agroclimática de la provincia de Zaragoza*. Dirección General de la Producción Agraria, 43 pp., anexos y plano.
- SÁNCHEZ, J.Á. y GARRIDO, E. (1989). *Impacto hidrológico e hidroquímico de los futuros regadíos de Monegros II en los sectores pertenecientes a la provincia de Huesca*. Informe Instituto de Estudios Altoaragoneses (inédito).