



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA

Métodos para estimar la escorrentía de una cuenca de pequeño tamaño

Apellidos, nombre	Ibáñez Asensio, Sara (sibanez@prv.upv.es) Moreno Ramón, Héctor (hecmoda@prv.upv.es) Gisbert Blanquer, Juan Manuel (jgisbert@prv.upv.es)
Departamento	Producción Vegetal
Centro	Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural



1 Resumen

Existen diferentes métodos para estimar la escorrentía que se generará en una zona a partir de sus datos climáticos, topográficos, edáficos, etc... Se utilizan en el ámbito de la ingeniería, tanto civil como agronómica o forestal, siendo igualmente muy comunes en conservación de suelos.

La mayor parte de ellos son de naturaleza empírica, por lo que para que la estima sea realmente fiable es necesario que las condiciones de nuestra cuenca sean similares a los supuestos sobre los que se han desarrollado y validado los diferentes métodos. Sin embargo hoy por hoy es muy difícil disponer de tablas elaboradas a partir de datos tomados en España por lo que la aplicación de de estos métodos deber de realizarse con extrema cautela, evitando su uso su uso en caso de duda o incertidumbre.

A continuación abordaremos el estudio de las metodologías más ampliamente utilizadas en nuestro país para el caso de trabajar con cuencas de pequeño tamaño.

2 Objetivos

Con el presente artículo docente se pretende que el lector sea capaz de:

- Entender la importancia de conocer de forma exhaustiva las características de la zona de estudio (tipo de suelo, vegetación, manejo, relieve y topografía)
- Estimar el flujo de escorrentía previsiblemente esperable en una cuenca dada
- Diferenciar las ventajas y deficiencias de cada uno de los posibles métodos de estima

3 Estructura e introducción

El presente artículo docente se estructura en los siguientes puntos:

1. Resumen de ideas clave
2. Objetivos
3. Estructura e introducción
4. Desarrollo
 - 4.1. Fórmula racional
 - 4.2. Método de Cook o del sumatorio
 - 4.3. Método del número de curva
5. Cierre
6. Bibliografía

Si seguimos todos estos apartados al final tendremos una idea clara de cómo estimar el flujo de escorrentía que se generará en una cuenca dada cuando se



produzca una precipitación determinada, consiguiendo por tanto, superar los objetivos propuestos. No obstante y para poder llegar a entender con claridad todo lo expuesto en este artículo antes deberemos saber que el comportamiento del suelo frente a un episodio de lluvia depende de las propiedades del propio suelo (textura, estructura, humedad previo, composición, etc ...), de las características del medio físico (topográficas, geológicas y de uso) y finalmente, pero no por ello de menor importancia, de los aspectos topográficos que condicionan el tiempo de concentración característico de la cuenca.

Todos estos aspectos son abordados en profundidad en otros documentos disponibles para el alumno en el repositorio institucional de la UPV de objetos de aprendizaje (Riunet). Si el lector no dominara alguno de ellos deberá acudir previamente a éstas ayudas o acudir a algún texto específico de edafología.

4 Desarrollo

4.1 Fórmula racional

Es un método muy apropiado cuando la información disponible de la zona de trabajo, de superficie no superior a 1.000 ha, no es muy exhaustiva; su validez además depende de la fiabilidad de los valores del coeficiente de escorrentía (c) y del tiempo de concentración empleados en el cálculo.

La expresión utilizada para el cálculo toma la siguiente forma:

$$Q = \frac{cIA}{360}, \text{ donde}$$

Q = caudal de escorrentía (m³/s)

c = coeficiente de escorrentía

I = intensidad de la precipitación (mm/h)

A = superficie de la cuenca (ha)

Para determinar el coeficiente de escorrentía (c) más acorde con las condiciones de relieve, vegetación, etc. de nuestra zona deberemos utilizar alguna tabla o ecuación desarrollada al efecto (consultar el Artículo Docente disponible en el repositorio Riunet de la UPV titulado "Métodos de determinación del coeficiente de escorrentía").

Para la intensidad de la precipitación (I), lo más indicado será utilizar aquella que genere la mayor escorrentía posible puesto que de esta forma estaremos seguros de que nuestras previsiones se cumplirán al menos durante el periodo de tiempo correspondiente al periodo de retorno (T) considerado (consultar los artículos docentes disponible en el repositorio Riunet de la UPV titulados "Estima de precipitaciones máximas" y "Métodos de determinación del tiempo de concentración").



Señalar por último que en la mayoría de las ocasiones la variabilidad espacial de la cuenca nos obligará a utilizar un valor medio del coeficiente de escorrentía (c), siendo conveniente hacer una media ponderada del valor correspondiente a cada una de las superficies de comportamiento homogéneo en las que podamos dividir la cuenca; veamos un ejemplo (figura nº 1):

Ejemplo de cálculo de la escorrentía: En una zona de meseta con el relieve ondulado con un uso mixto forestal y de pastos se desea construir una zanja de desviación que canalice el agua de escorrentía fuera del área. La cuenca tiene una extensión de 200 ha, de las cuales 150 ha son de bosque y 50 de pasto. Calcular la escorrentía prevista para un periodo de retomo de 5 años.

Aplicando los valores aportados por Raws: $C = (0,18 \times 150 + 0,36 \times 50) / 200 = 0,225$

Aplicando los valores de Agres: $T_c = 41$ minutos

Según la curva de intensidad-duración-frecuencia de Elías Castillo $I = 40$ mm/h

Aplicando la fórmula racional: $Q = 0,225 \times 40 \times 200 / 360 = 5$ m³/s

Figura nº 1.- Ejemplo de cálculo mediante la fórmula racional

4.2 Método de Cook o del sumatorio (Σ)

Este método es muy útil para zonas no muy extensas (menos de 500 ha de superficie) de las que se dispone de mucha información de aspectos tales como su forma, topografía, vegetación, tipo de suelo y retención superficial (o micro-relieve). Al ser un método empírico sólo es aplicable a cuencas que presenten condiciones físicas análogas a las cuencas experimentales utilizadas en su validación.

El método es extremadamente sencillo de aplicar puesto que únicamente requiere del uso de 2 tipos de tablas: una incluye la topografía, la vegetación y el tipo de suelo de la cuenca; y la otra, su tamaño y forma.

En el método original (desarrollado para los EE.UU.) cada una de las características analizadas presenta 4 posibles valores W_i , debiéndose elegir aquél que más se asemeje a nuestro caso (figura nº 2). Lógicamente el resultado será más fiable cuanto mayor sea nuestro conocimiento de la zona de trabajo, aconsejándose ponderar el valor de W_i cuando la variabilidad espacial de la característica en cuestión así lo aconseje.



	(100) <i>Extrema</i> (40)	(75) <i>Alta</i> (30)	(50) <i>Normal</i> (20)	(25) <i>Baja</i> (10)
<i>Relieve</i>	Terreno abrupto y quebrado con pendientes medias generalmente superiores al 30%	Terreno alomado, con pendientes medias entre el 10 y el 30%	Terreno ondulado, con pendientes medias entre el 5 y el 10%	Tierra relativamente llana, con pendientes medias del 0 al 5%
<i>Infiltración en el suelo</i>	Sin cobertura edáfica efectiva; roca desnuda o suelo delgado, con capacidad de infiltración despreciable	Lenta absorción del agua; arcillas u otros suelos de escasa infiltración (suelos pegajosos)	Limo profundo, normal, con infiltración prácticamente igual a la del suelo de pradera	Elevada; arena profunda u otro suelo que tome el agua fácil y rápidamente
<i>Cobertura vegetal</i>	Sin cobertura vegetal efectiva; terreno desnudo o con cobertura muy dispersa	Pobre o ligera; cultivos limpios o cobertura natural dispersa; menos del 10% del área con manto adecuado	Moderada a buena; cerca del 50% del área cubierta por pradera, bosque o manto equivalente; menos del 50% del área con cultivos limpios	Buena a excelente; cerca del 90% del área de la cuenca cubierta por pradera, bosque o manto equivalente
<i>Retención en superficie</i>	Despreciable; depresiones superficiales escasas y sometidas; lechos de drenaje cortos y pendientes; sin charcas ni pantanos	Baja; sistema definido de pequeños cauces de drenaje; sin charcas ni pantanos	Normal; considerable retención en depresiones superficiales; los lagos, charcas y pantanos ocupan menos del 2% del área	Elevada; mucho almacenamiento en depresiones superficiales; sistema de drenaje pobremente definido

Del *Engineering Handbook for Farm Planners; Upper Mississippi Valley Region III*, United States Soil Conservation Service, 1953.

Figura nº 2.- Valores W_i para diferentes condiciones de relieve, tasa de infiltración, cobertura vegetal y micro-relieve del terreno Fuente: N. Hudson (1982)

Obtenido el valor más representativo para cada W_i , sumaremos los 4 datos para obtener la W total de la cuenca, como así se observa en el siguiente ejemplo (figura nº 3):

Ejemplo de elección de valores W_i : Determinar la escorrentía en una zona boscosa de 450 ha de extensión y relieve abrupto que ha sufrido un intenso incendio en 1/3 de su superficie; aunque con suelo profundo y de textura arenosa, la retención superficial es mínima debido a lo elevado de la pendiente.

Aplicando los valores de la tabla anterior: $W=40+5+(20 \times 0,33 + 5 \times 0,66) + 20 = 75$

Figura nº 3.- Ejemplo de cálculo del valor W en una cuenca no totalmente homogénea



A continuación deberemos entrar en una de las 3 tablas siguientes, que elegiremos en atención a la forma de la cuenca: alargada (figura nº 4), cuadrada (figura nº5) o apaisada (figura nº6). Las 3 son tablas de doble entrada (valor de W y superficie A de la cuenca expresada en acres) que tienen como salida el valor estimado de la escorrentía para un periodo de retorno de 10 años expresada en pies cúbicos por segundo.

Escorrentía para una cuenca de forma alargada (estrecha y larga)

A \ c	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
5	4	6	8	10	12	15	18	21	24	27	31	35
10	7	10	12	15	20	26	32	38	44	51	58	65
15	9	14	19	25	32	40	48	57	66	75	85	95
20	12	18	25	32	40	50	60	70	80	95	110	125
30	16	25	35	45	55	70	85	100	115	135	155	175
40	19	30	42	55	70	90	110	130	150	175	200	225
50	23	35	50	65	85	110	135	160	185	210	240	275
75	30	50	70	95	120	150	185	220	255	295	340	390
100	35	60	85	120	160	205	250	295	345	395	450	510
150	45	85	125	170	220	280	340	410	485	560	640	725
200	55	100	150	205	280	360	445	535	630	730	830	935
250	65	125	190	260	340	440	550	665	780	900	1020	1145
300	80	145	220	300	390	490	600	720	850	990	1150	1350
350	100	170	260	340	460	580	700	830	980	1160	1340	1510
400	110	210	290	400	520	670	800	920	1120	1300	1500	1660
450	120	220	320	440	580	740	880	1020	1240	1420	1670	1810
500	130	230	340	470	630	800	960	1110	1350	1560	1800	1970

Figura nº 4.- Valor de Q para una cuenca alargada

Para obtener la escorrentía en metros cúbicos por segundo basta con entrar en la tabla con la superficie expresada en ha y multiplicar el valor de salida por 0,07. Además, si deseáramos estimar la escorrentía para un periodo de retorno diferente simplemente deberemos multiplicar la Q obtenida por un factor corrector específico para el T desado:

- 0,90 para T= 2 años
- 0,95 para T= 5 años
- 1,25 para T= 25 años
- 1,5 para T= 50 años



Esorrentia para una cuenca de forma cuadrada o redondeada

A \ c	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
5	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	25	30
10	5	8	11	14	17	21	25	30	35	40	46	52
15	7	11	15	20	25	30	35	42	50	58	66	75
20	10	15	20	25	30	38	46	55	65	75	85	95
30	12	18	25	33	42	52	64	76	90	105	120	135
40	15	20	30	40	50	65	80	95	110	130	150	175
50	17	25	35	50	65	80	100	120	140	165	190	215
75	20	35	50	70	90	115	140	170	200	235	270	310
100	25	45	65	90	120	150	180	220	260	300	350	400
150	35	60	90	125	165	210	260	310	365	425	500	580
200	40	80	120	170	220	270	330	400	470	550	640	750
250	50	90	140	190	245	310	385	470	565	670	785	910
300	60	100	150	210	280	360	450	550	660	780	910	1050
350	70	120	180	240	330	430	540	640	760	890	1030	1160
400	80	140	200	280	370	490	600	710	860	990	1160	1280
450	90	150	220	300	410	540	660	780	940	1090	1280	1390
500	100	160	240	330	450	590	720	850	1030	1200	1390	1520

Figura nº 5.- Valor de Q para una cuenca cuadrada

Veamos el final del cálculo de la esorrentia (expresada en m³/s) para los 3 tipos posibles de cuenca y un periodo de retorno de 25 años; los valores de la esorrentia expresada en pies cúbicos por segundo correspondientes a los 3 tipos de cuenca para un periodo de retorno de 10 años aparecen remarcados con un círculo rojo en las figuras nº 4, 5 y 6;

Ejemplo de estima método de Cook: Siguiendo con el ejemplo anterior, tratándose de una cuenca de 450 ha de superficie y W=75, estimar la esorrentia para un periodo de retomo T=25

Si su forma fuera redondeada (1ª tabla): $Q = Q(T=10) \times 1,25 = 1280 \times 0,07 \times 1,25 = 112 \text{ m}^3/\text{s}$

Si fuera apaisada (2ª tabla) $Q = Q(T=10) \times 1,25 = 1100 \times 0,07 \times 1,25 = 96,25 \text{ m}^3/\text{s}$

Si fuera alargada (3ª tabla) $Q = Q(T=10) \times 1,25 = 1670 \times 0,07 \times 1,25 = 146,1 \text{ m}^3/\text{s}$



Escorrentía para una cuenca de forma apaisada (corta y ancha)

A \ C	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
5	3	4	5	6	8	10	12	14	16	19	22	25
10	4	6	9	12	15	18	22	26	30	35	40	45
15	6	9	12	16	20	25	30	35	41	47	53	60
20	7	11	16	21	27	33	39	46	54	62	70	80
30	9	15	21	28	36	46	56	66	76	88	100	115
40	12	20	28	36	46	58	70	85	100	115	130	145
50	15	25	35	45	60	75	90	105	120	135	155	175
75	20	32	45	60	80	100	120	145	170	195	225	255
100	25	40	55	75	100	130	160	190	220	255	290	330
150	32	55	80	105	140	180	225	270	315	360	410	470
200	40	70	100	135	180	235	290	345	405	470	540	615
250	45	80	120	160	215	280	345	415	490	570	660	760
300	50	90	135	190	250	320	400	480	570	670	780	900
350	60	100	150	200	280	370	470	550	660	770	890	1000
400	70	120	170	240	330	420	520	610	740	860	1000	1100
450	80	130	190	260	360	470	570	670	820	940	1100	1200
500	90	140	200	280	390	510	620	740	890	1040	1200	1320

Figura nº 6.- Valores de Q para una cuenca apaisada

4.3 Método del Número de curva

El método del número de curva utiliza como primer dato de entrada la lluvia precipitada (I) en la zona, asumiendo por tanto que en una misma cuenca diferentes lluvias provocarán diferentes escorrentías. Lo más conveniente será considerar para la estima aquella lluvia que genere mayor escorrentía, de ahí que debemos utilizar el tiempo de concentración (tc) como punto de entrada en las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) de nuestra zona.

Conocida la cantidad de lluvia precipitada la escorrentía generada puede obtenerse de forma gráfica (figura nº 7) o mediante la expresión matemática siguiente:

$$Q = \frac{(I - 0,2S)^2}{I + 0,8S}$$

Donde Q = escorrentía (mm)

I = cantidad de lluvia (mm)

S es la diferencia máxima potencial entre la lluvia caída y la

escorrentía generada $S = \frac{25.400}{N} - 254$

N = número de curva. Se obtiene mediante tablas

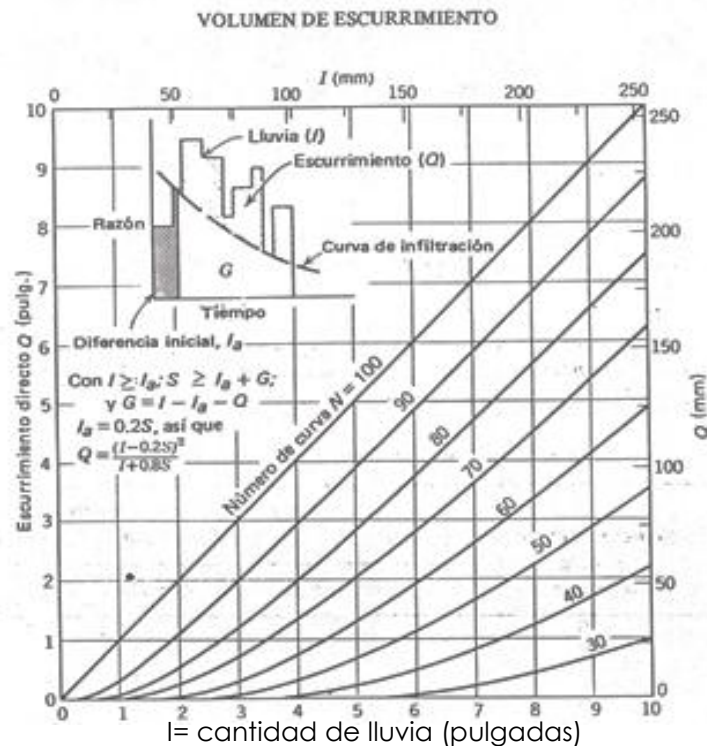


Figura nº 7.- Escorrentía (en mm ó pulgadas) generada en función de la cantidad de lluvia precipitada (en mm o pulgadas) y el nº de curva (N) característico del terreno

El valor del nº de curva N de entrada en la ecuación e en el gráfico se obtiene mediante tablas; las condiciones del terreno contempladas son: uso de la tierra, medidas de conservación empleadas en el cultivo, estado de compactación del terreno en relación a su uso, capacidad de infiltración del suelo en atención a su textura y, finalmente, condición previa de humedad del suelo.

El valor del nº de curva asignado al suelo en función de su estado en el momento de la producirse la precipitación varía entre 1 y 100, siendo mayor cuanto peor sea su situación; así por ejemplo un mismo suelo destinado al cultivo de tomates generará más escorrentía si los surcos de plantación se realizan a favor de la pendiente que según curvas de nivel, incluso recibiendo la misma lluvia y con las mismas condiciones previas de humedad.

Igualmente será más desfavorable la situación de un pasto con una elevada carga ganadera en comparación de unas tierras de idéntica calidad pero un manejo más sostenible (con un nº de cabezas más reducido por ejemplo).

Puedes encontrar una relación completa del valor del nº de curva para los diferentes usos, grupos hidrológicos, medidas de conservación y estados del terreno en el artículo docente titulado "Tablas del nº de curva del USDA" disponible en el repositorio Riunet de la UPV o en cualquier texto especializado en conservación de suelos.



El dato obtenido en dichas tablas es el correspondiente a un estado de humedad del suelo intermedio (condición II). Caso de encontrarnos en una situación diferente (lluvia previa → más escorrentía, y al revés) deberemos modificar el N obtenido mediante la tabla nº 8.

■ Conversión del número de curva de la condición II a las condiciones I y III

Número de curva en la condición	Número de curva correspondiente a las condiciones	
11	1	111
100	100	100
95	87	99
90	78	98
85	70	97
80	63	94
75	57	91
70	51	87
65	45	83
60	40	79
55	35	75
50	31	70
45	27	65
40	23	60
35	19	55
30	15	50
25	12	45
20	9	39
15	7	33
10	4	26
5	2	17
0	0	0

Figura nº 8.- Valores de N según las condiciones previas de humedad del suelo

En cualquier caso, y a diferencia con los métodos anteriores (racional y Cook) en el caso del método del nº de curva se trabaja con volúmenes de agua, y la conversión de una magnitud en otra (volúmenes-caudales) la realizaremos utilizando igualmente el tiempo de concentración (que es el tiempo de duración de la lluvia más desfavorable).

5 Cierre

Es posible realizar la estima de la escorrentía en una cuenca hidrográfica para una tormenta dada (normalmente la de mayor agresividad) y un periodo de retorno concreto aplicando con rigor los parámetros y coeficiente establecidos en la metodología que empleemos en el cálculo.

Para ello deberemos tener un conocimiento profundo y veraz tanto de los factores implicados en el proceso de la generación de la escorrentía como de las características de la cuenca en estudio.

De los tres métodos analizados, fórmula Racional, método de Cook y método del nº de curva, únicamente el primero y el último toman en consideración la importancia que tiene en la generación de la escorrentía la intensidad de la precipitación pluvial. Lógicamente las tormentas de mayor agresividad producen mayores escorrentías que los episodios de una intensidad menor aunque de mayor duración en el tiempo.

Por otra parte, solamente el último método plantea la necesidad de conocer la humedad previa del terreno en el momento de producirse una nueva precipitación,



contemplando la posibilidad de que el suelo se encuentre ya saturado en el momento de iniciarse el nuevo evento.

En cualquier caso conviene recordar que, al igual como ocurre en la determinación del coeficiente de escorrentía, estos métodos han sido desarrollados empíricamente a partir de la toma de datos en campo en climas y situaciones diferentes a las condiciones mediterráneas de nuestro entorno. Nuestros suelos, su génesis y desarrollo, responden a las condiciones naturales (clima, vegetación, topografía y material parental) típicas de nuestra geografía, no quedando reflejadas en la mayoría de los métodos disponibles. Únicamente vuelve a ser el método del nº de curva el que nos proporciona valores para situaciones en ambientes áridos o semiáridos.

En cualquier caso, para que la estima realizada tenga un elevado grado de fiabilidad es necesario que el alumno conozca perfectamente el papel de todas las variables implicadas en el proceso de generación de la escorrentía.

Por último indicar que, y al igual de lo que ocurre en la determinación del tiempo de concentración, debes darte cuenta de que las variables que intervienen no son las mismas en todos los métodos y lógicamente cuanto más información requieras más laborioso será el trabajo de documentación, pero el resultados se ajustarán más a la realidad.

Y para terminar, decir que cuando los factores determinantes de la generación de la escorrentía no son homogéneos en toda la superficie de la cuenca es recomendable delimitar unidades de valores homogéneos, calcular el coeficiente correspondiente para cada una de ellas y obtener un valor único para toda la cuenca ponderando los valores individuales de cada unidad en función de su representatividad en el conjunto (lo más indicado es como % de la superficie total).

6 Bibliografía

6.1 Bibliografía

[1] Hudson, N., 1982. "Conservación de suelo" Reverte, 335 pp.

[2] López Cadenas de Llano, F. (Coord.), 1994. "Restauración hidrológico-forestal de cuencas" Mundi Prensa -Tragsa, 902 pp..

[3] López Cadenas de Llano, F. (Coord.). 2003. "La Ingeniería en los procesos de desertificación" Grupo Tragsa, 1045 pp.

[4] Schwab, G.O. - Frevert, R.K. - Edminster, T.W.. "Ingeniería de conservación de suelos y aguas", Ed. Limusa, 570 pp.