



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Estudio del comportamiento hidrológico de una pequeña cuenca forestal.

Alumno: INÉS BARBERO GARCÍA

Director académico: ÁNGEL MARQUÉS MATEU

Director experimental: SARA IBAÑEZ ASENSIO

JULIO, 2014

RESUMEN

La finalidad del estudio es la determinación del caudal pico de escorrentía para una cuenca de pequeño tamaño situada en la provincia de Valencia.

La escorrentía, o cantidad de agua que circula por la superficie de una cuenca, es responsable de importantes procesos erosivos, además puede poner en peligro la integridad de gran cantidad de obras públicas como carreteras, canales o embalses, o incluso dar lugar a inundaciones.

La correcta determinación de la escorrentía permite estudiar estos procesos y generar planes de actuación.

En el presente proyecto se ha llevado a cabo un estudio hidrológico de una cuenca de aproximadamente 800 Ha, situada entre los términos municipales de Alcira y Corbera.

El tratamiento de los datos necesarios, se ha realizado utilizando Sistema de Información Geográfico, principalmente en lo relativo a la obtención de los parámetros que relacionan la precipitación con la escorrentía.

Los cálculos de escorrentía se han realizado por el Método Racional y el Método del Número de Curva.

Palabras clave:

Hidrología, escorrentía, SIG, Barranco de la Murta.

ABSTRACT

The aim of this project is to determine the peak flow for a small river basin placed in the region of Valencia, Spain.

The runoff, or quantity of water flowing on the surface of a river basin, is responsible for important erosion processes. It can also entail a risk for a wide number of infrastructures such as channels, roads or reservoirs. Ultimately, it may even cause a flood.

Determining runoff correctly allows us to study all this processes and create useful prevention plans.

Collected data has been processed using Geographical Information Systems, mostly to obtain the parameters that relate rainfall and runoff flow.

Runoff calculation has been carried out by using the Rational Formula and the Curve Number Method.

Key words:

Hydrology, water runoff, GIS, Barranco de la Murta.

Índice

1. Introducció.....	5
2. Materials y métodos.....	7
2.1. Mètodes de càlcul de la escorrentia	7
2.1.1. Fòrmula racional.....	7
2.1.2. Mètode de Cook o del sumatori	11
2.1.3. Mètode del número de curva.....	15
3. Proceso y resultados	20
3.1. Delimitació de la cuenca de treball	20
1.1.1. Obtenció de la cartografia.....	20
1.1.2. Herramientas para la delimitació de la cuenca.....	21
1.1.3. Proceso	21
1.1.4. Resultado.....	25
3.2. Obtenció de la informació necesaria.....	25
3.2.1. Obtenció de los datos de precipitaciones	26
3.2.2. Obtenció de datos de vegetació	32
3.2.3. Obtenció de datos del suelo.....	33
3.3. Càlcul de la escorrentia	34
3.3.1. Mètode racional	34
3.3.2. Mètode de Cook o del sumatori	41
3.3.3. Càlcul del número de curva	43
3.3.4. Càlcul de valores finales de escorrentia por cada mètode	44
4. Conclusiones.....	53
5. Bibliografía	54

Anexos

Mapa de coeficiente de escorrentia. Mètode de Raws

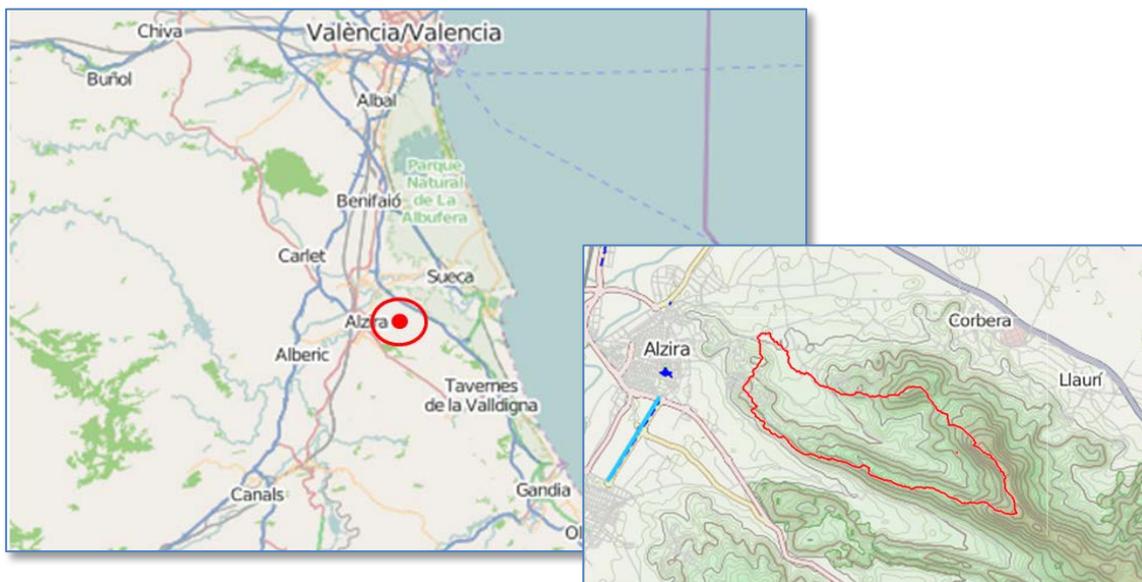
Mapa de coeficiente de escorrentia. Mètode de Prevert.

Mapa de Número de Curva.

1. Introducción

El presente trabajo consiste en el estudio hidrológico de una pequeña cuenca hidrológica situada en la provincia de Valencia, concretamente entre los municipios de Alcira (en su mayor parte) y de Corbera.

La cuenca de estudio se encuentra en dentro de la cuenca hidrográfica del río Júcar y su punto de desagüe está situado en la llanura de inundación de dicho río. Aunque en la cuenca no existe ningún cauce permanente cuenta con varios barrancos, siendo el de mayor importancia el barranco de La Murta.



Ubicación de la cuenca de estudio.

La finalidad del trabajo es calcular el caudal pico de escorrentía que puede tener lugar en la cuenca de estudio. Para ello de los valores de lluvia máxima diaria anual y se utilizan varios métodos para transformar los valores de escorrentía.

El conocimiento de los valores máximos de escorrentía, y con él el conocimiento de los volúmenes máximos a desaguar, tiene múltiples aplicaciones.

Calcular la escorrentía es necesario en estudios de erosión y conservación del suelo, también es de vital importancia en estudios de inundabilidad y creación de mapas de riesgo (puede mencionarse dentro de la comunidad valenciana el Plan de Acción

Territorial de Caràcter Sectorial sobre Prevenció del Risc de Inundació en la Comunitat Valenciana, PATRICOVA).

Por supuesto, el conocimiento de la escorrentía también es necesario para el correcto dimensionamiento de las obras de drenaje en obras públicas como embalses o carreteras, entre otras. Como prueba de esto tenemos el hecho de que una parte importante de la información necesaria para la realización de este trabajo se ha obtenido de publicaciones ligadas con la Dirección General de Carreteras.

Al estar la escorrentía totalmente ligada tanto al terreno en sí mismo (topografía, usos del suelo, geología, etc.) como a factores que se distribuyen de manera continua sobre este (precipitación, coeficiente de variación) en su estudio son de gran utilidad los sistemas de información geográfica, ya que permiten trabajar con un volumen de información mucho mayor del que soportan los métodos clásicos y hacerlo de manera mucho más rápida, eficiente y automatizada.

En este trabajo se utilizará un sistema de información geográfico y software ArcGIS para realizar los cálculos de escorrentía por varios métodos que se valorarán para obtener los mejores resultados posibles.

2. Materiales y métodos

2.1. Métodos de cálculo de la escorrentía

Existen una gran cantidad de métodos de cálculo de la escorrentía siendo todos ellos empíricos y cada uno adaptado a una zona y unas características concretas, por tanto, los resultados pueden variar mucho y no todos serán de aplicación a este ámbito de estudio. Además hay que tener en cuenta que apenas existen métodos desarrollados para España, lo que hace que haya que realizar una evaluación más detallada de cada uno de los que se utilizan.

A continuación se explican brevemente y de manera teórica cuales los métodos de cálculo más comunes, aunque no todos ellos pueden ser utilizados para este caso concreto y, como veremos más adelante, estarán sujetos a modificaciones para adaptarse a las características de la cuenca de estudio.

En concreto, vamos a tener en cuenta el método racional, el método de Cook o del sumatorio y el método del número de curva.

2.1.1. Fórmula racional

Es un método muy utilizado, aunque solo se recomienda su uso para cuencas de menos de 1000 Ha.

Esta basado en la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{cIA}{360}$$

Siendo:

Q=Caudal de escorrentía (m³/s)
c=coeficiente de escorrentía
I= intensidad de precipitación (mm/h)
A=superficie de la cuenca (ha)

El factor que más atención requiere es el coeficiente de escorrentía, este valor es diferente para cada cuenca y se calcula en función de varios factores, como son la topografía, el uso del suelo y la edafología.

Puede definirse como la fracción de agua del total de lluvia precipitada que realmente genera escorrentía superficial una vez que se ha saturado completamente el suelo.

Existen varios métodos de cálculo de este coeficiente, utilizando tanto tablas como fórmulas. El método de cálculo es de gran importancia y afecta en gran medida al resultado ya que cada coeficiente tiene en cuenta unos factores diferentes.

En el presente trabajo van a utilizarse el método de Prevert y el método de Raws, también se explican otros métodos que no se utilizarán al no adaptarse bien a las características de la cuenca.

2.1.1.1. Métodos de cálculo del coeficiente de escorrentía. Raws

Este método solo tiene en cuenta el relieve y el tipo de cubierta vegetal como factores determinantes del coeficiente de escorrentía. Se corresponde con la siguiente tabla.

	C
Bosque. Relieve ondulado	0,18
Bosque. Relieve quebrado	0,21
Pasto. Relieve ondulado	0,36
Pasto. Relieve quebrado	0,42
Cultivos. Relieve ondulado	0,60
Cultivos. Relieve quebrado	0,72

2.1.1.2. *Métodos de cálculo del coeficiente de escorrentía. Prevert*

Tiene en cuenta, además de la pendiente y la cubierta vegetal, el tipo de suelo, además clasifica la pendiente en un número mayor de categorías. Se corresponde con la siguiente tabla:

Uso del suelo	Pendiente (%)	Textura del suelo (%)		
		Arenos-limoso Limoso-arenoso	Limoso Limoso-arcilloso	Arcilloso
Bosque	0 – 5	0,10	0,30	0,40
	5 – 10	0,25	0,35	0,50
	10 – 30	0,30	0,40	0,60
	> 30	0,32	0,42	0,63
Pastizal	0,15	0,15	0,35	0,45
	5 – 10	0,30	0,40	0,55
	10 – 30	0,35	0,45	0,65
	>30	0,37	0,47	0,68
Cultivo agrícola	0 – 5	0,30	0,50	0,60
	5 – 10	0,40	0,66	0,70
	10 – 30	0,50	0,70	0,80
	> 30	0,53	0,74	0,84

2.1.1.3. *Métodos de cálculo del coeficiente de escorrentía. Otros*

Existen varios métodos de cálculo del coeficiente de escorrentía que se han valorado pero se ha decidido no utilizar ya que no se adaptan bien a la zona de trabajo. Se menciona brevemente en qué consisten:

- **Método de Molchanov:**

Tipo de escorrentía	Pendiente del terreno (en grados)	Densidad y uso de la cubierta vegetal	Tipo de suelo	C %
I	1° - 35°	D > 0,6 Sin pastoreo	Franco-arenoso	5%
II	5° - 35°	0,5 > D > 0,4 Con pastoreo ocasional	Franco-pedregoso	6 – 25%
III	5° - 40°	0,4 ≥ D > 0,1 Con pastoreo permanente	Franco-pedregoso	25 – 50%
IV	5° - 40°	0,4 ≥ D > 0,1 Con pastoreo intensivo	Franco-pedregoso	50 – 75%
V	5° - 40°	0,4 ≥ D > 0,1 Con pastoreo intensivo	Arcilloso	> 75%

Es bastante similar al método de Prevert, pero no abarca pendientes mayores de 40°, por lo que se descarta para este trabajo.

- **Fórmula de Nadal**

$$C=0,25*K_1*K_2*K_3$$

Siendo:

K_1 =factor de extensión de la cuenca.

K_2 =factor de lluvia media anual.

K_3 =factor de pendiente y permeabilidad.

Factores que se obtienen con la siguiente tabla:

Extensión		Lluvia media anual		Características de la Cuenca	K_3
Km^2	K_1	mm	K_2		
10	2.60	200	0.25		
20	2.45	300	0.50	Llana y permeable	0.5 – 0.7
40	2.15	400	0.75	Ondulada	0.5 – 1.2
100	1.80	500	1.00	Montañosa e impermeable	1.2 – 1.5
200	1.70	600	1.10		
500	1.40	700	1.17		
1.000	1.30	800	1.25		
5.000	1.00	900	1.32		
10.000	0.90	1.000	1.40		
20.000	0.87	1.200	1.50		

Su principal diferencia con los anteriores es que incluye la lluvia media anual como un factor de cálculo, no se utiliza por estar pensado para áreas mayores y porque el factor “características de la cuenca” no se corresponde en ninguno de sus valores con la zona de trabajo, que en nuestro caso es más permeable en la zona más montañosa.

- **Fórmula de Keler**

$$C = a - \frac{b}{P}$$

Siendo:

a= coeficiente entre =0,88 y 1, tomando el valor 1 las cuencas torrenciales.

b= coeficiente que oscila entre 350 y 460, tomando el valor 350 las cuencas torrenciales.

P=precipitación media anual (mm).

Además de no contarse entre los métodos más utilizados en este tipo de proyecto, su uso requeriría del estudio de los valores de torrencialidad de la cuenca por lo que se ha decidido no incluirlo en este trabajo.

2.1.2. Método de Cook o del sumatorio

Este método se recomienda para cuencas pequeñas, preferiblemente de menos de 500 Ha, un valor que la cuenca de estudio supera ampliamente, a pesar de ello se menciona por ser un método bastante utilizado y que podría ser de aplicación si dividiésemos la zona en varias subcuencas de menor tamaño.

Además, este método solo da buenos resultados en cuencas de características muy similares a aquellas para las que se ha calculado.

Consta de dos tablas, la primera asigna valores en función de la topografía, la cobertura vegetal, la infiltración y la retención en superficie.

Como puede verse, se realiza un sumatorio, de ahí su nombre. Cada factor recibe un valor en función de la morfología de la zona, la suma de todos ellos nos da un resultado de 25 a 100 que se identifica con la escorrentía generada en función del volumen de precipitación.

	(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.

La siguiente tabla da el valor de escorrentía y varia en función de la forma de la cuenca, hay que mencionar que la salida es el valor estimado de la escorrentía para un periodo de retorno de 10 años expresada en pies cúbicos por segundo (se dividirá el resultado entre 35,315 para obtener los metros 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



Escorrentia 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

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

Hay que tener en cuenta que este método no utiliza datos de precipitaciones, por lo que si estos son muy distintos de aquellos para los que se calculó los resultados empeorarán significativamente.

2.1.3. Método del número de curva

Este método fue desarrollado por el Departamento de Agricultura de los EE.UU. (USDA), está basado en la siguiente fórmula:

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

Siendo

Q= Escorrentía (mm)

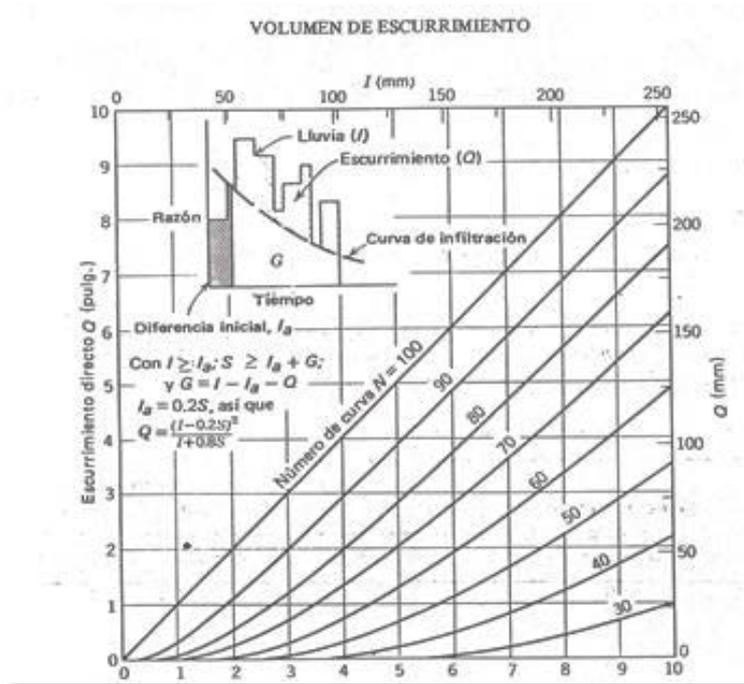
I=Cantidad de lluvia (mm)

S= Diferencia máxima potencial entre la lluvia caída y la escorrentía generada.

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

Dónde:

N= Número de curva



Gráfica relación número de curva- escorrentía generada.

El número de curva es similar al coeficiente de escorrentía ya que también relaciona la escorrentía generada con la cantidad de lluvia y toma valores de 0 a 100, tal como puede verse en la gráfica.

Como puede observarse, este método no da como resultado valores de escorrentía sino milímetros de lámina de agua acumulados para toda el área de la cuenca. Esto es debido a que este método es muy utilizado para cálculos de erosión, en este caso concreto habrá que transformar posteriormente el valor de lámina de agua a escorrentía.

El número de curva se obtiene mediante tablas que tienen en cuenta el uso de la tierra, medidas de conservación empleadas en el cultivo, estado de compactación del terreno, capacidad de infiltración del suelo en relación a su textura y condición previa de humedad del suelo, entre otros.

Existen gran cantidad de tablas de número de curva, aquí tenemos un ejemplo:

Clase	Laboreo	Condiciones hidrológicas para la infiltración	Numeros de curva correspondientes a los grupos hidrológicos del suelo			
			A	B	C	D
Barbecho	-	-	77	86	91	94
Cultivos alineados	R	Pobres	72	81	88	91
	R	Buenas	67	78	85	89
	C	Pobres	70	79	84	88
	C	Buenas	65	75	82	86
	C-T	Pobres	66	74	80	82
	C-T	Buenas	62	71	78	81
Cultivos no alineados o con surcos pequeños o mal definidos	R	Pobres	65	76	84	88
	R	Buenas	63	75	83	87
	C	Pobres	63	74	82	85
	C	Buenas	61	73	81	84
	C-T	Pobres	61	72	79	82
	C-T	Buenas	59	70	78	81
Cultivos densos de leguminosas o prados en alternativa	R	Pobres	66	77	84	88
	R	Buenas	58	72	81	85
	C	Pobres	64	75	83	85
Pastizales (pastos naturales)	C	Buenas	55	69	78	83
	C-T	Pobres	63	73	80	83
	C-T	Buenas	51	67	76	80
	-	Pobres	68	79	86	89
	-	Regulares	49	69	79	84
	-	Buenas	39	61	74	80
Prados permanentes. Montes con pastos (ganadero-forestal)	C	Pobres	47	67	81	88
	C	Regulares	25	59	75	83
	C	Buenas	6	35	70	79
	-	-	30	58	71	78
	-	Pobres	45	66	77	83
	-	Regulares	36	60	73	79
Bosques (forestales)	-	Buenas	25	55	70	77
	-	Muy pobres	56	75	86	91
	-	Pobres	46	68	78	84
	-	Regulares	36	60	70	76
	-	Buenas	26	52	63	69
	-	Muy buenas	15	44	54	61
Caseños	-	-	59	74	82	86
Camino de tierra	-	-	72	82	87	89
Camino en firme	-	-	74	84	90	92

Fuente: "Ingeniería de conservación de Suelos y Aguas"

Significado de los códigos R, C y C-T:

Laboreo del terreno.- La forma en que se realice las labores del terreno inducen en la escorrentía, de modo que en la clasificación expuesta, las letras que aparecen en la segunda columna, tienen el siguiente significado.

R = Cuando las labores de la tierra, la siembra y las restantes faenas son ejecutadas sin tener en cuenta la pendiente del terreno.

C = Cuando el cultivo es por curvas de nivel.

C-T = Cuando el cultivo es por curvas de nivel y existen además terrazas abiertas (con desagüe) para la conservación del suelo.

En terrenos de pendiente interior a 2% se considera como si fuera por curvas de nivel

Los grupos hidrológicos en los que se divide el suelo son de menor a mayor escorrentía generada:

- **Grupo A:** Suelos con gran permeabilidad incluso estando saturados. Suelos profundos, sueltos, con poca arcilla o limo y gran porcentaje de arena y/o grava.
- **Grupo B:** Permeabilidad moderada. Son los terrenos arenosos menos profundos, los franco-arenosos de profundidad media y los francos profundos.
- **Grupo C:** Suelos poco permeables al tener algún estrato impermeable o una textura arcillosa o franco-arcillosa.
- **Grupo D:** Muy impermeables, gran cantidad de arcillas.

Además el método tiene en cuenta la condición de humedad previa, de tal forma que el resultado puede transformarse en función de la humedad previa del suelo, de esta forma si queremos calcular la escorrentía para la situación más desfavorable posible podremos suponer que el suelo se encontraba saturado previamente.

Condiciones precedentes de humedad		
Lluvia total caída durante los cinco días anteriores		
Condición	En el período húmedo (Oct-Mar) o durante la dormancia	En el período seco (Abr-Sep) o durante el crecimiento.
I	Menos de 12,5 mm	Menos de 35,5 mm
II	De 12,5 a 28 mm	De 35,5 a 53 mm
III	Más de 28 mm	Más de 53 mm

Tabla de condición previa de humedad para el método del número de curva



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

Tabla de conversión en función de la humedad previa para el método del número de curva.

3. Proceso y resultados

3.1. Delimitación de la cuenca de trabajo

La zona de trabajo es la cuenca hidrológica correspondiente al barranco de la Murta, ubicado entre los términos municipales de Alcira y de Corbera y al este del centro urbano de Alcira. Esta zona se corresponde con la hoja topográfica 770 del MTN50.

Las coordenadas de la zona de la zona de estudio son:

$$X_{\text{máx}} = 731023,45 \text{ m}$$

$$X_{\text{mín}} = 723042,24 \text{ m}$$

$$Y_{\text{máx}} = 4337874,60 \text{ m}$$

$$Y_{\text{mín}} = 4332538,59 \text{ m}$$

Sistema de coordenadas ETRS89, proyección UTM huso 30.

1.1.1. Obtención de la cartografía

El primer paso es delimitar el área de estudio, para ello se empezará reuniendo toda la información cartográfica necesaria.

- Ortofotos 1:5.000 del año 2012 correspondientes a las hojas 077021, 077022, 077031 y 077032 (Terrasit, ICV).
- MDT 05- Lidar para la hoja 770 (IGN).

Dado que son necesarias hasta cuatro ortofotos para cubrir la zona de trabajo utilizamos la herramienta de Arcmap "Mosaic to new raster" para unir las en un único archivo raster, posteriormente recortaremos el mosaico con ayuda de un feature class de tipo polígono que delimita nuestra zona de estudio.

En el caso del MDT utilizado, ya cubre ampliamente la zona de trabajo por lo que no será necesario realizar mosaico alguno, en lugar de esto solo realizaremos el recorte de la zona de estudio.

1.1.2. Herramientas para la delimitación de la cuenca

Para llevar a cabo la delimitación se van a utilizar el modelo digital de elevaciones junto con las herramientas de ArGIS “Spatial Analyst” ->“Hidrology”.



1.1.3. Proceso

1. Utilizamos la herramienta “Fill” sobre el MDT, esto nos ayudará a eliminar pequeñas imperfecciones en los datos que den lugar a zonas de drenaje interno, como resultado obtenemos un nuevo MDT que será el que usemos a partir de este paso.
2. Con la herramienta “Flow direction” conseguimos un raster en el que cada pixel almacena como información la dirección hacia la que se vierte el agua, este raster es imprescindible para las siguientes operaciones:

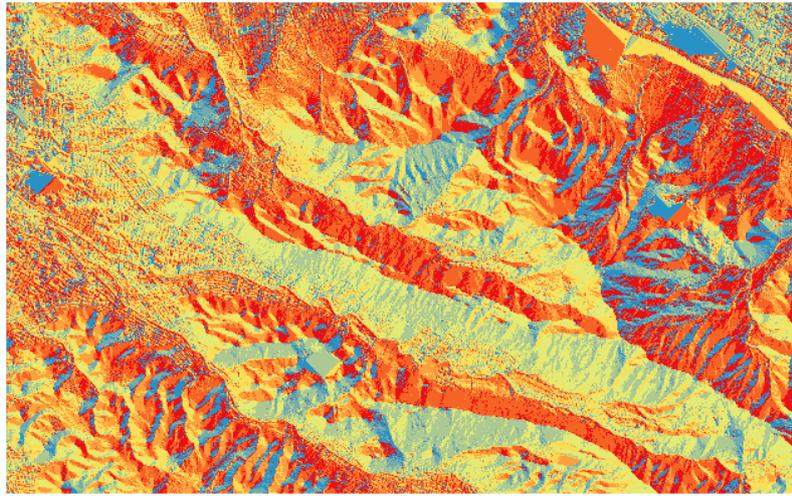
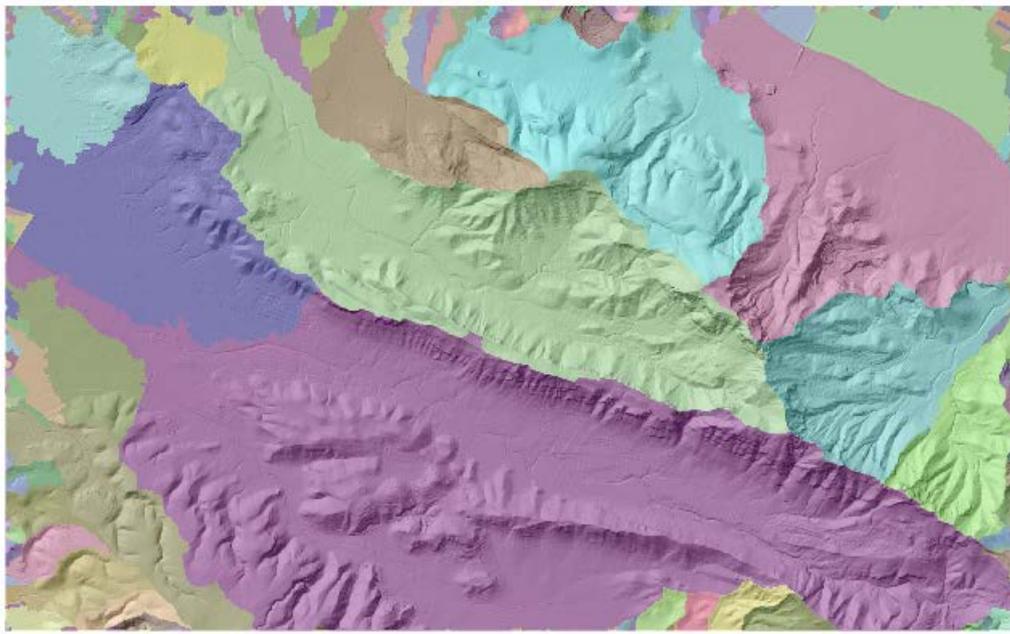


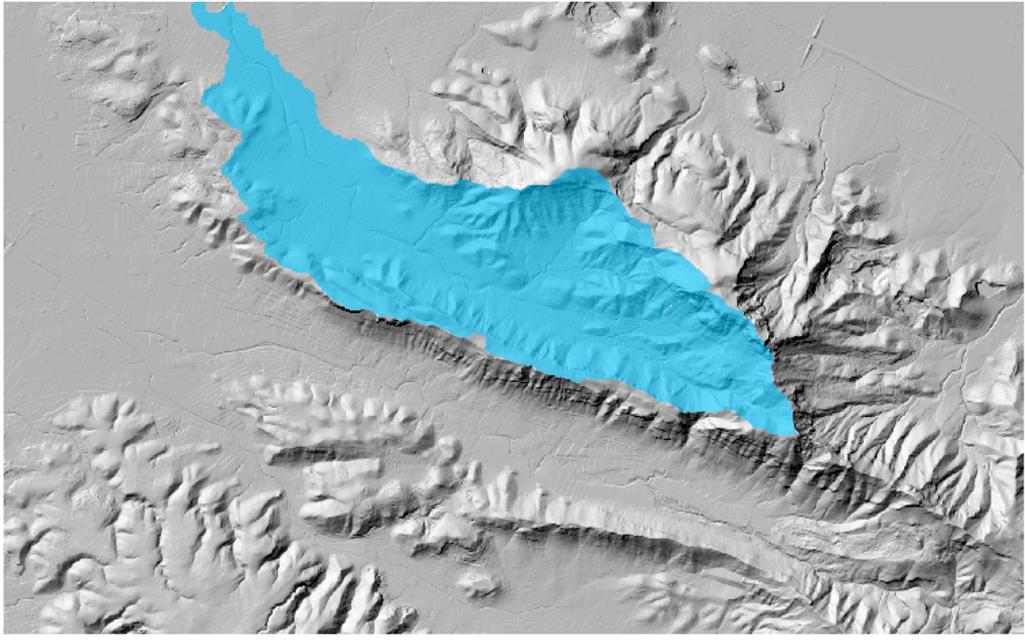
Imagen raster de direcció del flujo.

3. A partir del flow direction raster podemos delimitar las distintas cuencas de la zona usando la herramienta "basin":



Diferentes cuencas hidrográficas existentes en la zona.

4. Para extraer la cuenca de interés se utiliza la herramienta “Extract by attributes”.



Primera cuenca delimitada.

5. Podemos ver que la cuenca se ha delimitado de manera más o menos correcta pero para toda la zona que ocupa el MDT, nos interesa definir un punto concreto como punto de drenaje.
6. Con la herramienta “Flow Accumulation” creamos un raster de flujo acumulado para cada punto partiendo del raster de dirección del flujo.

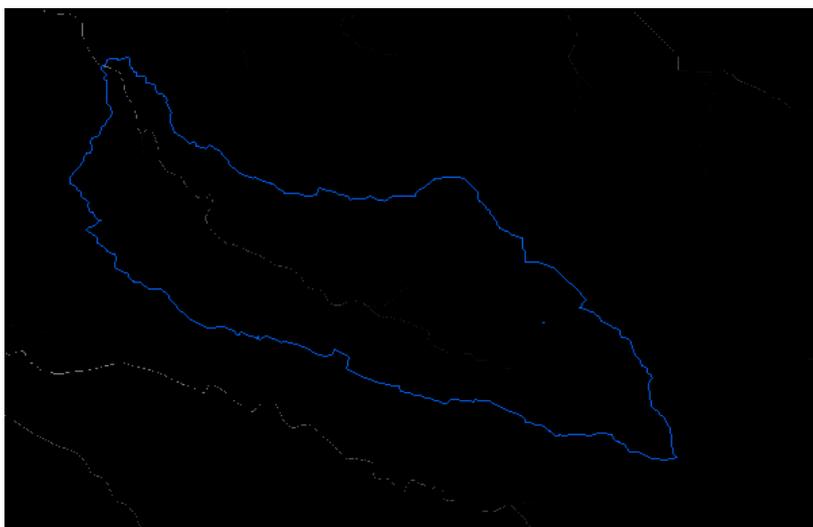


Imagen raster de acumulación del flujo.

Este resultado nos será de gran utilidad para definir el punto de drenaje. Vemos que los puntos de máximo flujo acumulado coinciden, como es lógico, con el barranco de la Murta.

7. Creamos un nuevo shape de tipo punto y definimos en él nuestro punto de drenaje que limitará la cuenca.



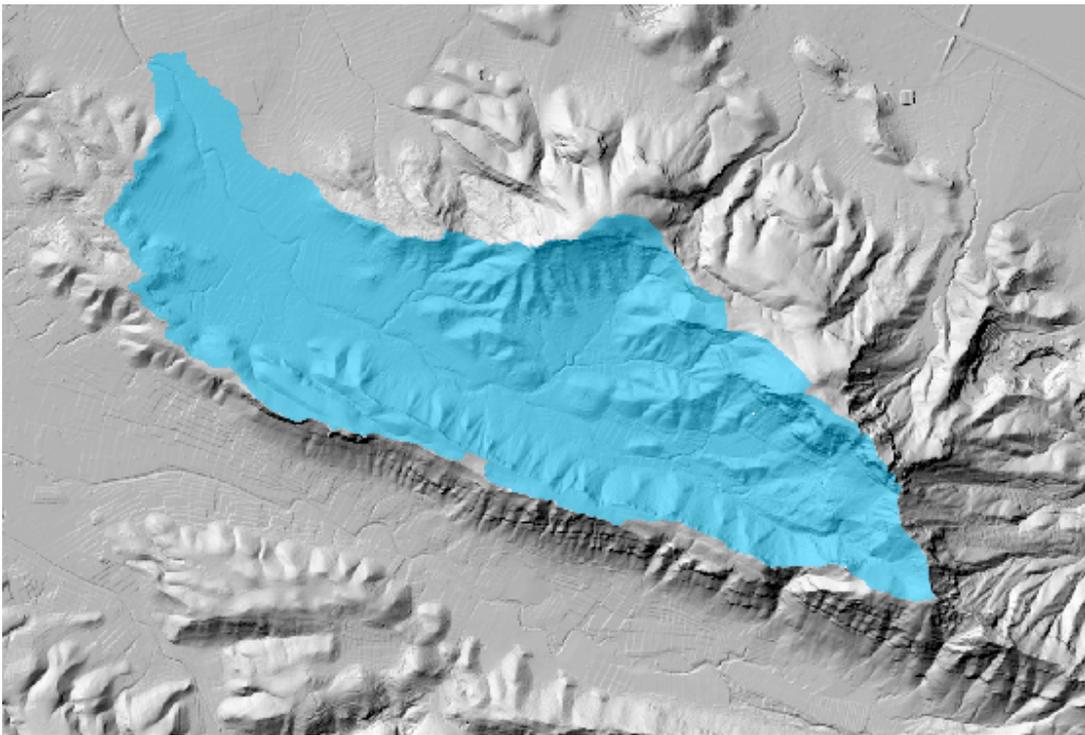
Imagen del punto de desagüe escogido.

8. Volvemos a definir la cuenca pero esta vez introduciendo el punto definido como punto de drenaje y utilizando la herramienta "Watershed", el resultado es la cuenca final de estudio.

1.1.4. Resultado

La cuenca delimitada en el paso anterior será con la que trabajemos a partir de este punto,

Superficie de la cuenca: 829,620 Ha



Delimitación final de la cuenca de estudio.

3.2. Obtención de la información necesaria

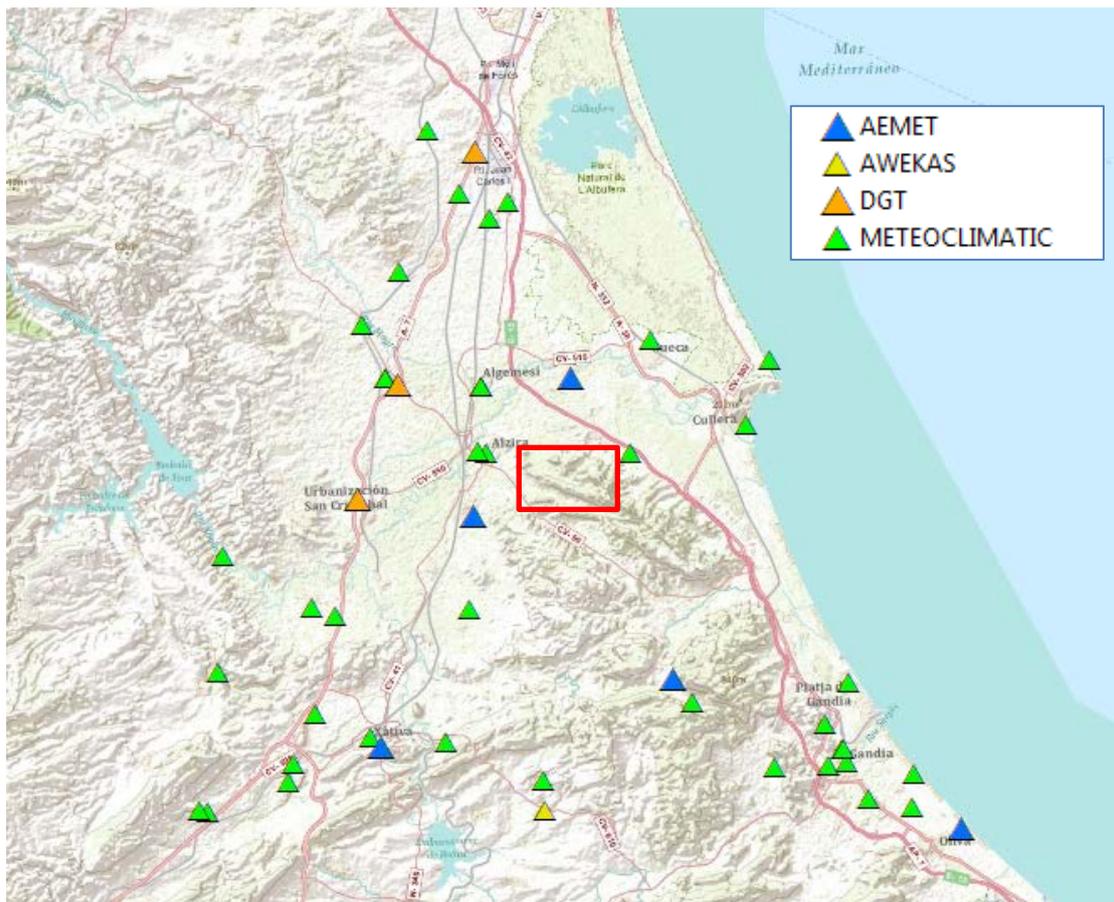
Múltiples factores influyen en la escorrentía generada por lo que es necesario reunir la información tanto de precipitaciones, como de cubierta vegetal y suelo para la zona de estudio. Para los tres factores se han analizado varias fuentes y se ha elegido aquella que mejor se correspondiese con la finalidad del trabajo.

3.2.1. Obtención de los datos de precipitaciones

El dato de mayor importancia en un estudio hidrológico es el volumen de precipitaciones que pueden caer en la zona para cada período de retorno. Para obtenerlo podemos basarnos en la información recogida en las estaciones meteorológicas de la zona.

Lo ideal sería disponer de datos de tormentas reales, para las cuales se conoce la cantidad de precipitación caída durante el tiempo de duración de la tormenta. Esto rara vez es posible, ya que en la mayoría de las ocasiones las precipitaciones se miden para intervalos de 24 horas. El problema es que rara vez llueve de manera constante durante un período de 24 horas, por lo cual necesitaremos adaptar esos datos a los periodos de tiempo que nos interesan.

Existen varias estaciones meteorológicas en la zona pertenecientes a diferentes organismos, destacando AEMET y DGT:



Mapa de estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio.

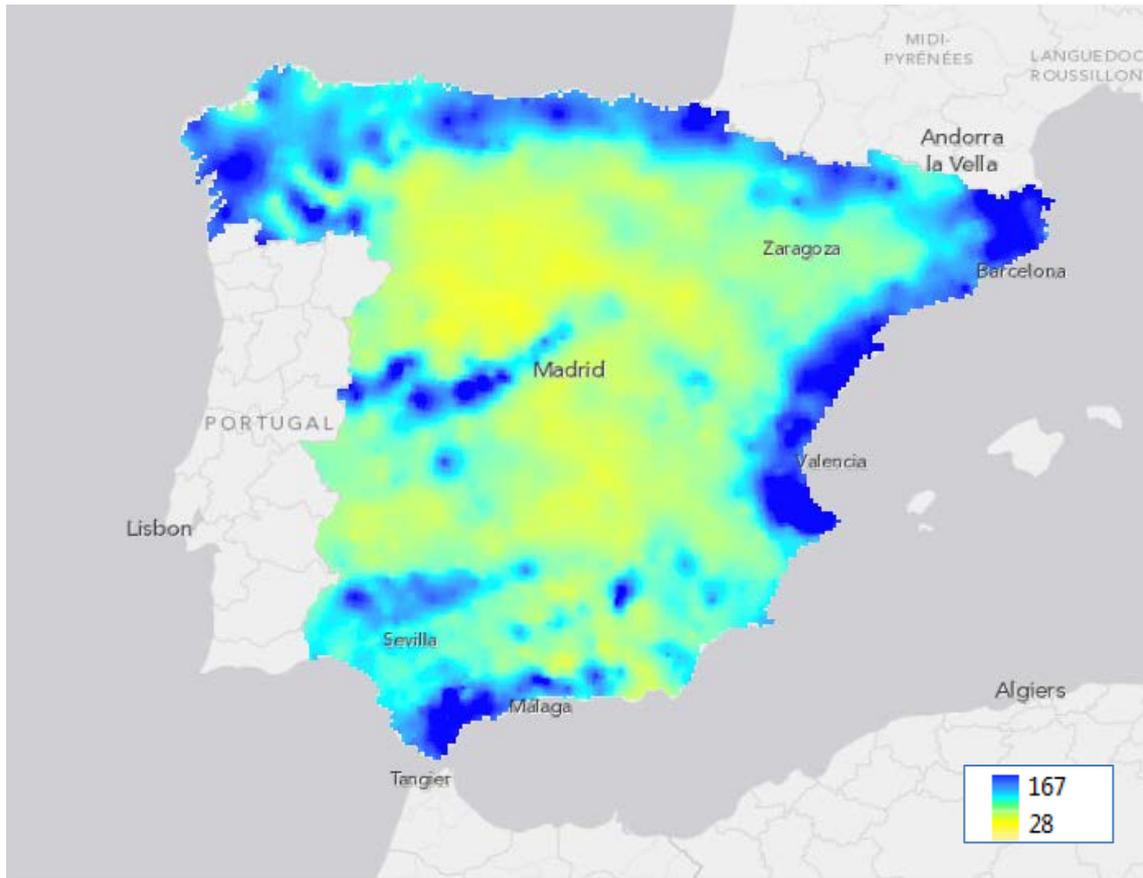
Como puede verse existe un buen número de estaciones meteorológicas en la zona pero dado que las precipitaciones no son un fenómeno fácilmente interporable finalmente se decide tomar como fuente de información de precipitaciones el documento *Máximas Lluvias en la España Peninsular, 1999*, publicado por un convenio formado por la Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento y el Centro de Estudios Hidrográficos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, así como el software que lo acompaña.

Este documento se ha creado a partir de los valores recogidos en un total de 1545 estaciones meteorológicas de la AEMET, a partir de ellas se obtuvieron valores de precipitación máxima diaria anual y coeficiente de variación para una malla de 2,5 km en todo el territorio nacional.

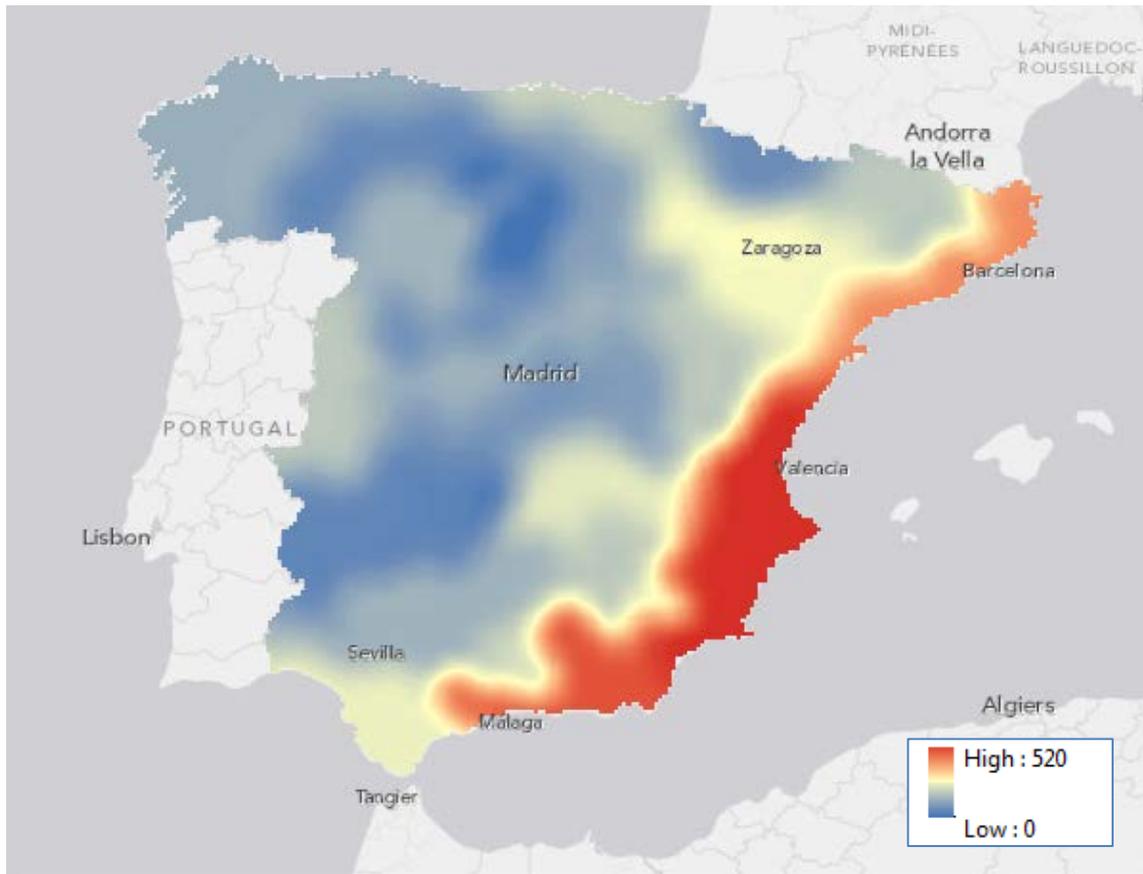
Obtenemos la siguiente información:

- **Valor medio de la máxima precipitación diaria anual.**
- **Coficiente de variación:** El mapa de Isolíneas de Cv fue obtenido mediante una interpolación espacial en una malla por el método del inverso de la distancia al cuadrado. Los datos empleados para la interpolación fueron las 1545 estaciones “básicas” a las que se asigna el Cv regional correspondiente.
- **Factor de amplificación Kt**

Este mapa muestra la malla de 2'5 km con los diferentes valores de lluvia máxima diaria anual, es decir, cantidad de precipitación que cae, de media, el día del año que más llueve para cada cada píxel. Esta media se calcula a partir de los valores medios de los años en los que llevan funcionando las estaciones.



Mapa de valor medio de la precipitación máxima diaria anual. Máximas lluvias en la España Peninsular, 1999



Mapa de coeficiente de variación. Máximas lluvias en la España Peninsular, 1999

C _v	PERIODO DE RETORNO EN AÑOS (T)							
	2	5	10	25	50	100	200	500
0.30	0.935	1.194	1.377	1.625	1.823	2.022	2.251	2.541
0.31	0.932	1.198	1.385	1.640	1.854	2.068	2.296	2.602
0.32	0.929	1.202	1.400	1.671	1.884	2.098	2.342	2.663
0.33	0.927	1.209	1.415	1.686	1.915	2.144	2.388	2.724
0.34	0.924	1.213	1.423	1.717	1.930	2.174	2.434	2.785
0.35	0.921	1.217	1.438	1.732	1.961	2.220	2.480	2.831
0.36	0.919	1.225	1.446	1.747	1.991	2.251	2.525	2.892
0.37	0.917	1.232	1.461	1.778	2.022	2.281	2.571	2.953
0.38	0.914	1.240	1.469	1.793	2.052	2.327	2.617	3.014
0.39	0.912	1.243	1.484	1.808	2.083	2.357	2.663	3.067
0.40	0.909	1.247	1.492	1.839	2.113	2.403	2.708	3.128
0.41	0.906	1.255	1.507	1.854	2.144	2.434	2.754	3.189
0.42	0.904	1.259	1.514	1.884	2.174	2.480	2.800	3.250
0.43	0.901	1.263	1.534	1.900	2.205	2.510	2.846	3.311
0.44	0.898	1.270	1.541	1.915	2.220	2.556	2.892	3.372
0.45	0.896	1.274	1.549	1.945	2.251	2.586	2.937	3.433
0.46	0.894	1.278	1.564	1.961	2.281	2.632	2.983	3.494
0.47	0.892	1.286	1.579	1.991	2.312	2.663	3.044	3.555
0.48	0.890	1.289	1.595	2.007	2.342	2.708	3.098	3.616
0.49	0.887	1.293	1.603	2.022	2.373	2.739	3.128	3.677
0.50	0.885	1.297	1.610	2.052	2.403	2.785	3.189	3.738
0.51	0.883	1.301	1.625	2.068	2.434	2.815	3.220	3.799
0.52	0.881	1.308	1.640	2.098	2.464	2.861	3.281	3.860

Tabla del factor de amplificación K_T . Máximas lluvias en la España Peninsular, 1999.

3.2.1.1. Cálculo de lluvias máximas para la cuenca

Una vez hemos recolectado toda la información recortamos la necesaria para nuestra zona de trabajo, debemos tener en cuenta que estos valores son para un tamaño de píxel de 2500m, por lo que tendremos pocos valores diferentes dentro de la cuenca.

Es necesario calcular los valores de intensidad para los diferentes periodos de retorno, entendido este como el tiempo que transcurre entre dos sucesos (en este caso tormentas) con una determinada probabilidad. El periodo de retorno se elige en función de la finalidad del trabajo y del nivel de seguridad requerido. Para obras como embalses, por ejemplo, en las que debe tomarse siempre la condición más desfavorable, el tiempo de retorno será especialmente alto.

En este caso se ha decidido tomar un valor medio de tiempo de retorno de 25 años, ya que entra dentro de lo habitual en estudios hidrológicos.

La fórmula a utilizar para obtener los valores de precipitación máxima para los diferentes periodos de retorno es:

$$P_{\text{máxT}} = K_T * P_m$$

El factor de amplificación se obtiene a partir del coeficiente de variación, tal como aparece en la tabla anterior.

El coeficiente de variación es 0,518 para toda la cuenca, la lluvia media toma cuatro valores diferentes según la zona de la cuenca.

Para el coeficiente de variación de 0,518 interpolamos los K_T en la tabla para cada periodo de retorno, después calculamos los valores de precipitaciones máximas diarias para cada valor de valor de precipitaciones medias.

T (tiempo de retorno)	K _T (factor de amplificación)	P _{máx} [mm/día]			
		96	99	101	104
2	0,881	84,614	87,259	89,021	91,666
5	1,307	125,434	129,353	131,967	135,886
10	1,637	157,152	162,063	165,337	170,248
25	2,092	200,832	207,108	211,292	217,568
50	2,458	235,968	243,342	248,258	255,632
100	2,852	273,773	282,328	288,032	296,587
200	3,269	313,805	323,611	330,149	339,955
500	3,848	369,389	380,932	388,628	400,171

Tabla de valores de precipitación máxima diaria anual para diferentes periodos de retorno en la cuenca de estudio.

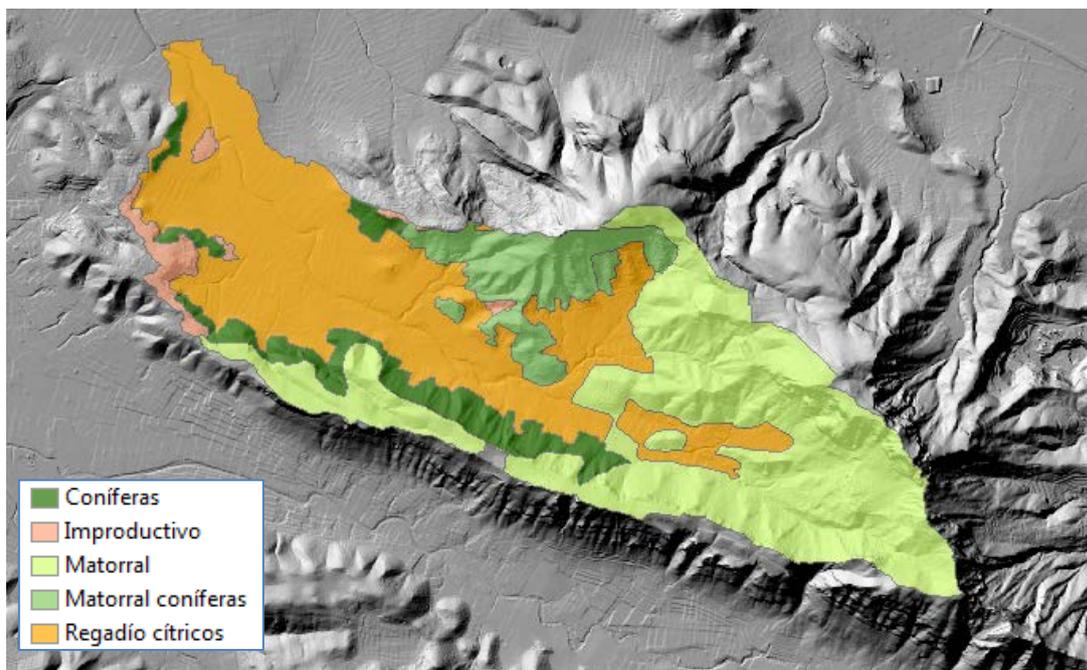
3.2.2. Obtención de datos de vegetación

Otro dato importante para los cálculos es el uso del suelo, un suelo con vegetación tiene mayor capacidad de drenaje que un suelo desnudo, donde la escorrentía superficial será mucho más importante. Si existen cultivos en abancalamiento los resultados de escorrentía variarán de manera muy significativa.

Para conseguir información sobre los usos del suelo se estudiaron, al igual que con el tipo de suelo, varias fuentes entre las que cabe destacar el SIOSE.

Finalmente decidió emplearse el *Mapa de cultivos y aprovechamientos 2000-2010*, creado por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, ya que tanto la escala como el nivel de detalle se adaptan bien a la finalidad requerida, teniendo en cuenta que para los métodos utilizados solo necesitaremos entre 3 y 4 categorías diferentes.

El mapa en formato WMS se digitalizó para la cuenca de estudio:



Mapa de vegetación de la cuenca de estudio, obtenido a partir del Mapa de cultivos y aprovechamientos 2000-2010, (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino).

3.2.3. Obtención de datos del suelo

Como hemos podido comprobar en el punto anterior la mayor parte de los métodos de cálculo de escorrentía van a necesitar información del suelo, principalmente se requiere conocer la permeabilidad de este, para cuantificar el volumen de agua que se infiltra y que, por tanto, no contribuye a la escorrentía superficial.

Para conseguir datos que se adapten a la finalidad del proyecto se han consultado varias fuentes, entre las que cabe destacar los mapas de permeabilidad del IGME a escala 1:200.000 y 1:1M y el Inventario Nacional de Erosión de Suelos (INES), tras estudiar estas fuentes se vio que están más enfocadas a otros ámbitos y que además la escala es demasiado pequeña para nuestro ámbito de estudio. También se consultaron mapas del El proyecto LUCDEME (Lucha contra la Desertificación en el Mediterráneo), pero no se encontró información para la hoja de Alcira.

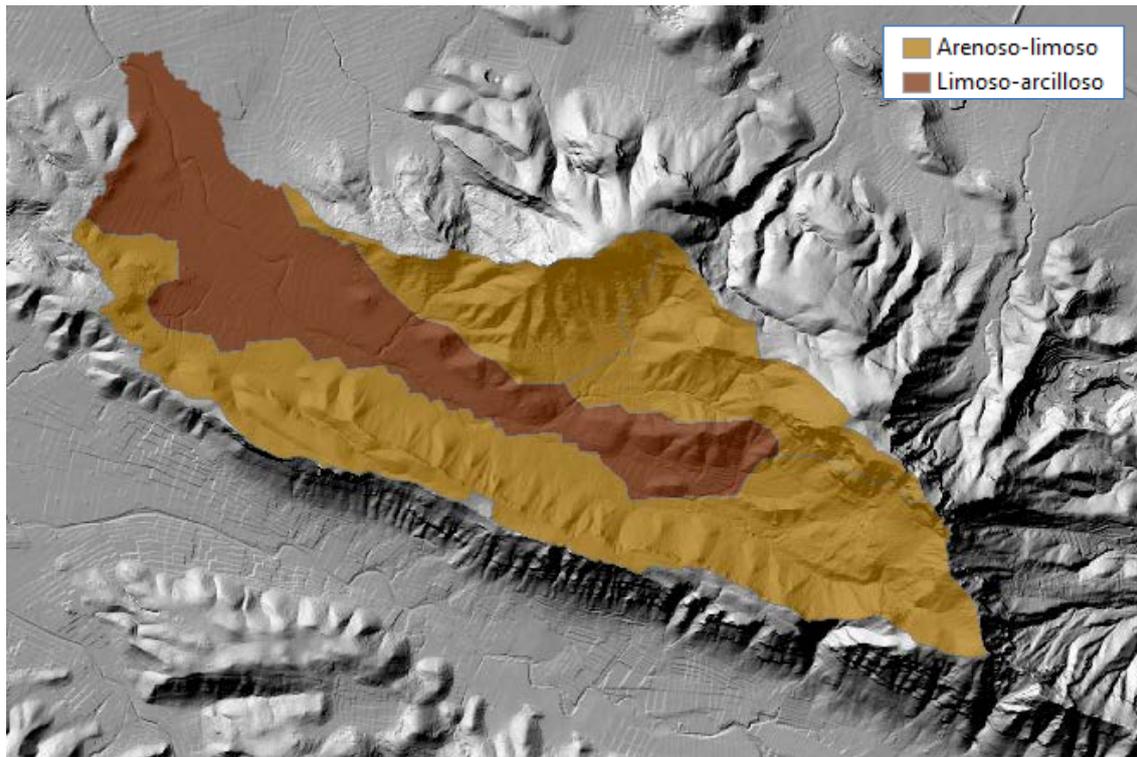
Finalmente se decidió tomar como referencia un proyecto de fin de carrera de la escuela de agrónomos: *Mapa de suelos interactivo de la hoja Topográfica de Alzira (2004)* ya que está pensado con una finalidad similar y su escala es mayor que en los mencionados anteriormente, 1:140.000.

Los mapas en formato papel se escanearon, georeferenciaron y digitalizaron adecuadamente para la zona de estudio, la información que aportan es:

- Tipo de suelo
- Nivel de arcillas
- Textura
- Estructura

Además para ciertos puntos se especifican porcentajes concretos de cada material, lo que nos permite establecer el tipo de clasificación que necesitamos.

En la zona se distinguen dos áreas, que se diferencian por la mayor presencia de arcilla en la zona más baja del valle.



Mapa de suelos de la cuenca de estudio, de acuerdo con la clasificación necesaria para el método de Prevert. Obtenido de *Mapa de suelos interactivo de la hoja Topográfica de Alzira(2004)*.

3.3. Cálculo de la escorrentía

Una vez se ha reunido toda la información previa se puede llevar a cabo el cálculo de la escorrentía.

3.3.1. Método racional

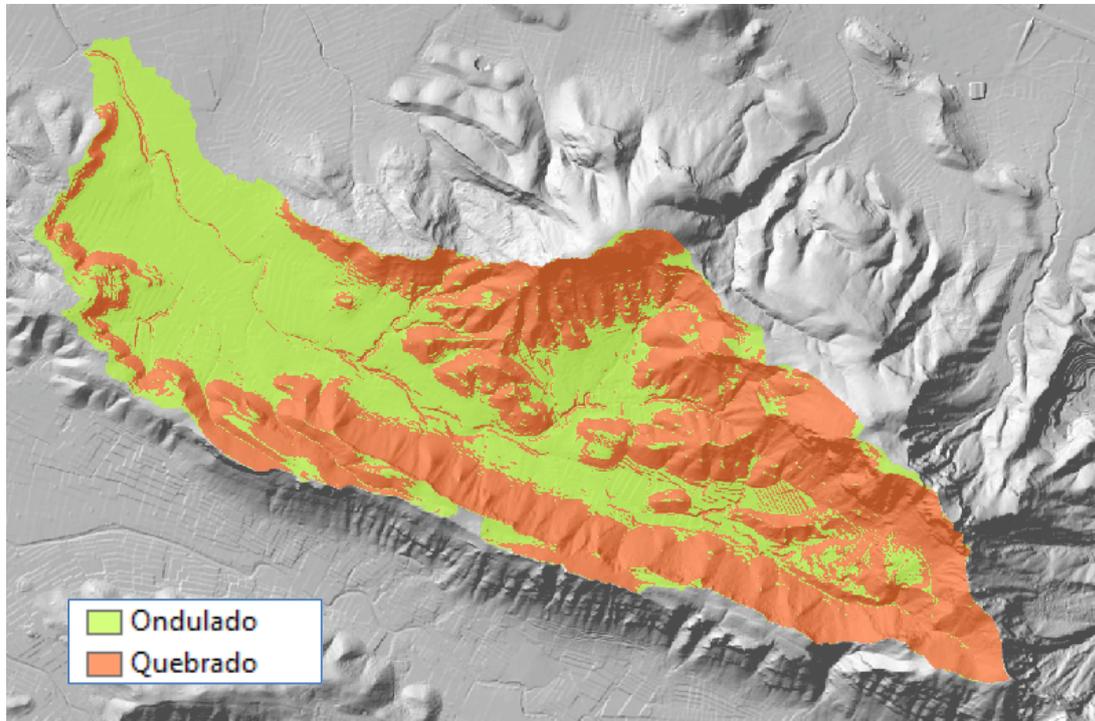
El primer paso para el cálculo de la escorrentía por este método es calcular los coeficientes, obviamente el coeficiente de escorrentía no es el mismo para toda la cuenca, aunque tradicionalmente esto se resolvía dividiendo la cuenca en zonas más o menos homogéneas, en este caso, al trabajar con un SIG podemos calcular un valor de coeficiente de escorrentía para cada píxel.

3.3.1.1. Cálculo de coeficiente de escorrentía. Método de Raws

Como pudimos ver en la tabla del punto anterior el coeficiente se calcula en función de la pendiente y la cubierta vegetal.

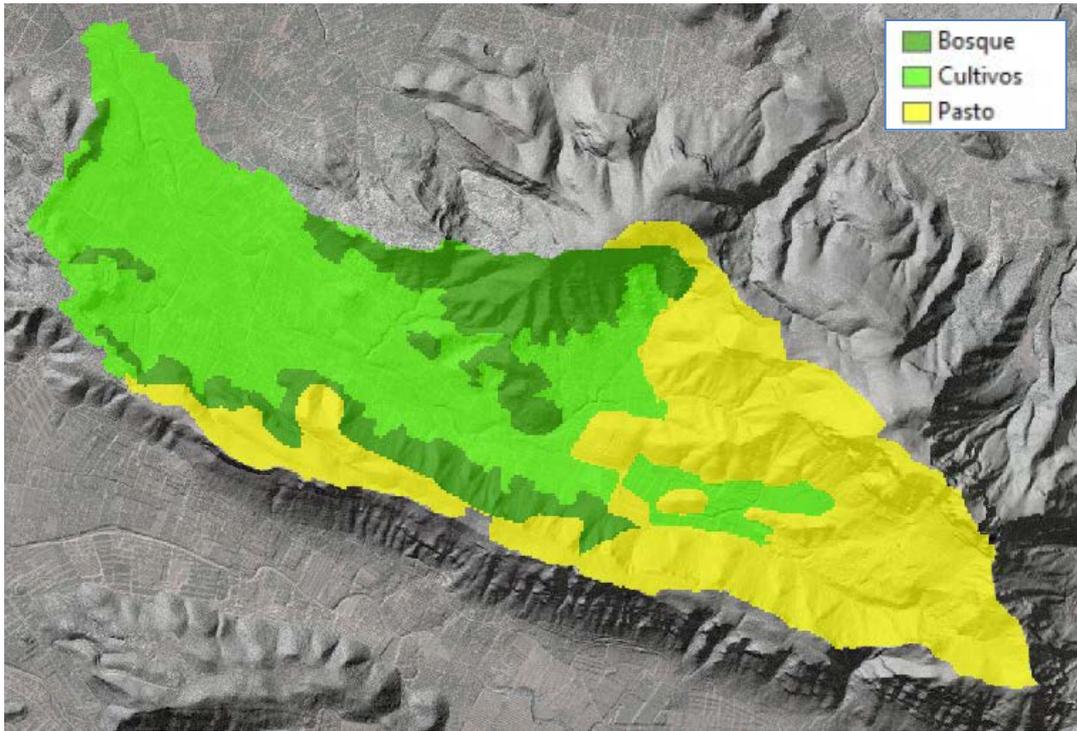
El primer paso consiste en reclasificar la información que disponemos en las clases que facilita la tabla.

- **Pendiente:** Tras consultar información de otros trabajos se decide fijar como umbral entre relieve ondulado y quebrado el 25% de pendiente.



Mapa de pendientes en los intervalos necesarios para el cálculo del coeficiente de escorrentía por el método de Raws.

- **Vegetación:** En cuanto a la vegetación se clasifica como bosque la zona de coníferas y matorral-coníferas, como pasto la de matorral y como cultivo el regadío y el terreno improductivo. Aunque se sabe que la correspondencia está lejos de ser exacta es la más lógica en términos de generación de escorrentía.



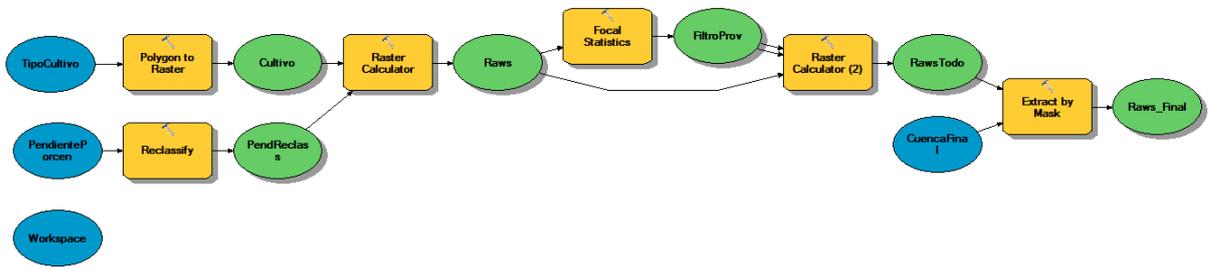
Mapa de cubierta vegetal, clasificada para el cálculo del coeficiente de escorrentía por el método de Raws.

Ambas reclasificaciones (pendiente y vegetación) se llevan a cabo con la herramienta “Reclassify”, después se combinan ambos valores con la herramienta “Raster calculator”.

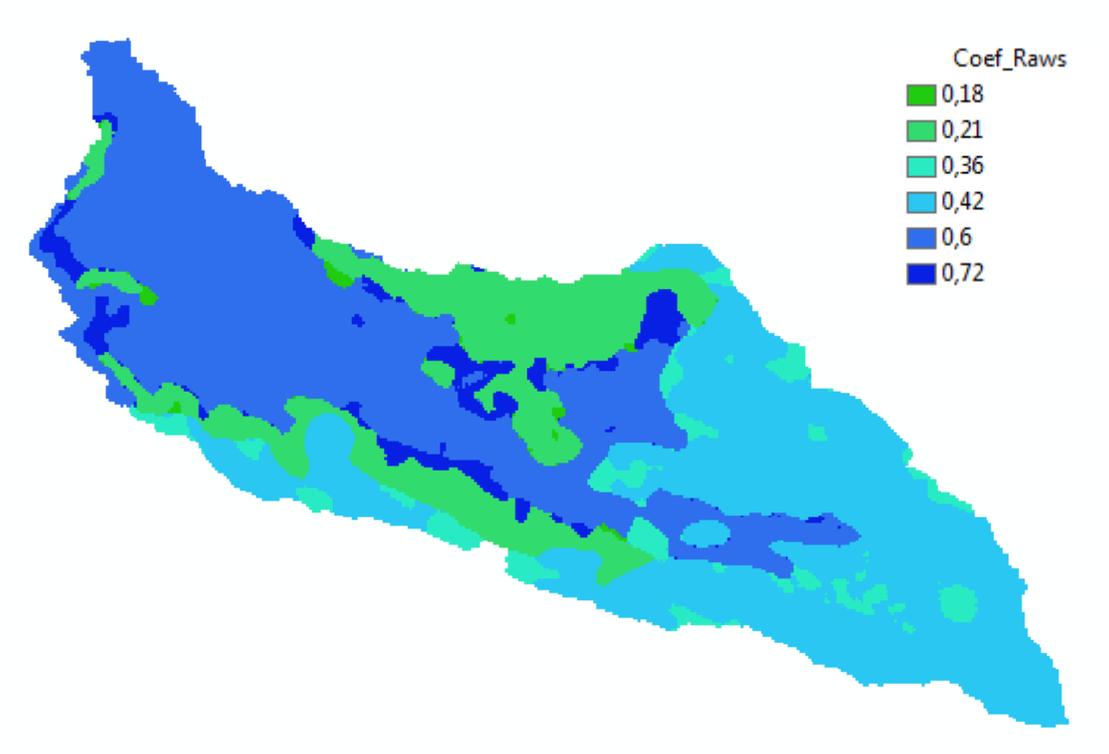
La metodología usada consiste en multiplicar uno de los valores por 1000 y sumar el otro valor, de esta forma tenemos ambos datos para cada píxel. Debe especificarse que el resultado sea un número entero, de esta forma podrá aplicarse un filtro de moda después.

Para mejorar el resultado se aplica un filtro de moda con la herramienta “Focal statistics”, escogiendo “Majority” como tipo de filtro. Al utilizar este filtro se crean píxeles con valores “NoData”, este problema se soluciona sustituyendo este valor “NoData” por su valor original, lo que se realiza con la herramienta “Raster calculator”.

Al utilizar el filtro nos encontraremos que la extensión ha aumentado ligeramente, por lo que utilizamos la herramienta “Extract by mask” para devolverlo a su extensión original.



Una vez obtenemos el resultado debemos darle a cada pixel el valor de coeficiente correspondiente en función del relieve y la vegetación. El primer resultado que se obtiene es el siguiente:



Mapa de coeficiente de escorrentía por el método de Raws, sin tener en cuenta los bancales.

Tras realizar un primer análisis de este resultado se observa que no coincide con la realidad.

En el área de estudio existen gran cantidad de bancales que tienen una pendiente prácticamente nula y que por tanto apenas generan escorrentía, sin embargo, este método divide la pendiente únicamente en dos clases, suponiendo una pendiente a los

bancales de hasta el 25%, y por tanto, atribuyéndole a esa zona unos valores de escorrentía muy por encima de la realidad.

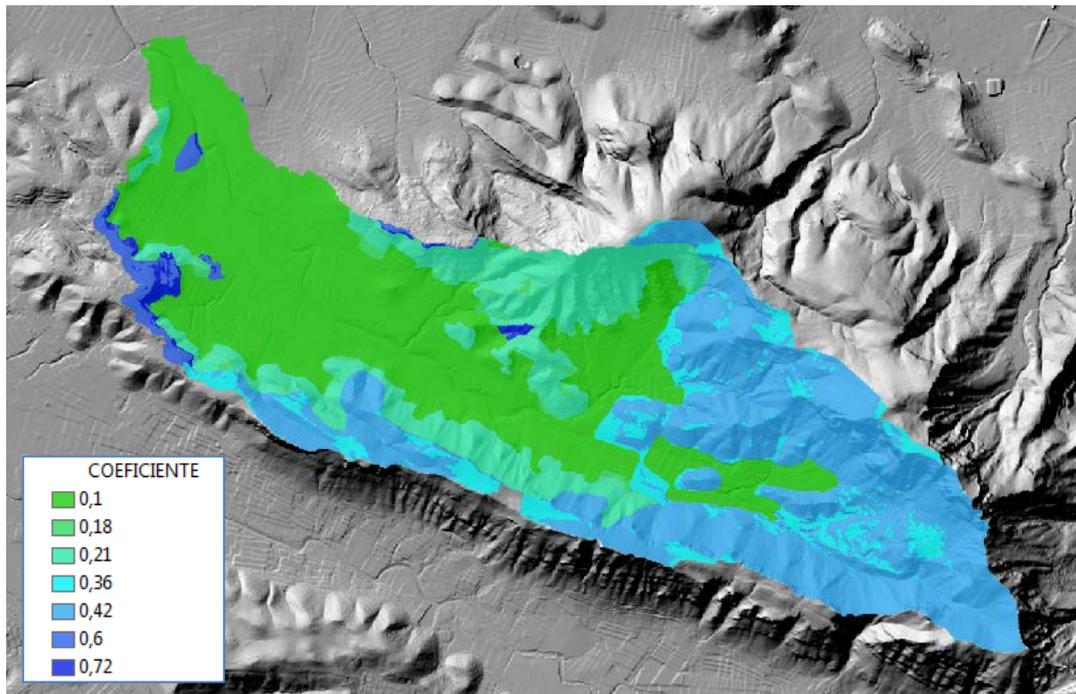
Este problema es debido a que el método no ha sido creado para esta zona y aparecerá también en el resto de métodos, aunque quizá no de forma tan grave. La solución es modificar el método para dar a la zona de bancal un valor acorde con la escorrentía generada, para ello se amplía la tabla de valores del coeficiente. Esta es la correspondencia que se va a utilizar:

Coefficiente método de Raws		
		C
Bosque	Relieve ondulado	0,18
Bosque	Relieve quebrado	0,21
Pasto	Relieve ondulado	0,36
Pasto	Relieve quebrado	0,42
Cultivos	Relieve ondulado	0,6
Cultivos	Relieve quebrado	0,72
Cultivos	Bancales	0,1

Tabla de coeficientes por el método de Raws tras incluir los bancales.

En cuanto a la delimitación de la zona de bancales, se estudia la ortofoto y se llega a la conclusión de que la totalidad de los cultivos son abancalados, por lo que toda la zona de cultivo tomará este nuevo valor.

El área de terreno improductivo, que se había clasificado como cultivo por simplificación, tomará los valores originales de cultivo sin bancales.



Mapa final de coeficiente de escorrentía por el método de Raws.

Valoración:

Si se analiza el resultado puede verse que la mayor cantidad de escorrentía se corresponde con pequeñas áreas urbanas ubicadas en zonas con una pendiente aceptable, las zonas de matorral ubicadas en las zonas de pendiente media aportan también una cantidad considerable de escorrentía.

Las zonas de bosque a pesar de estar ubicadas en gran parte en zonas de mucha pendiente generan una escorrentía menor debido a su espesa cobertura vegetal, por último las zonas de cultivo en bancales son, con diferencia, las que menos escorrentía generan.

3.3.1.2. Cálculo de coeficiente de escorrentía. Método de Prevert

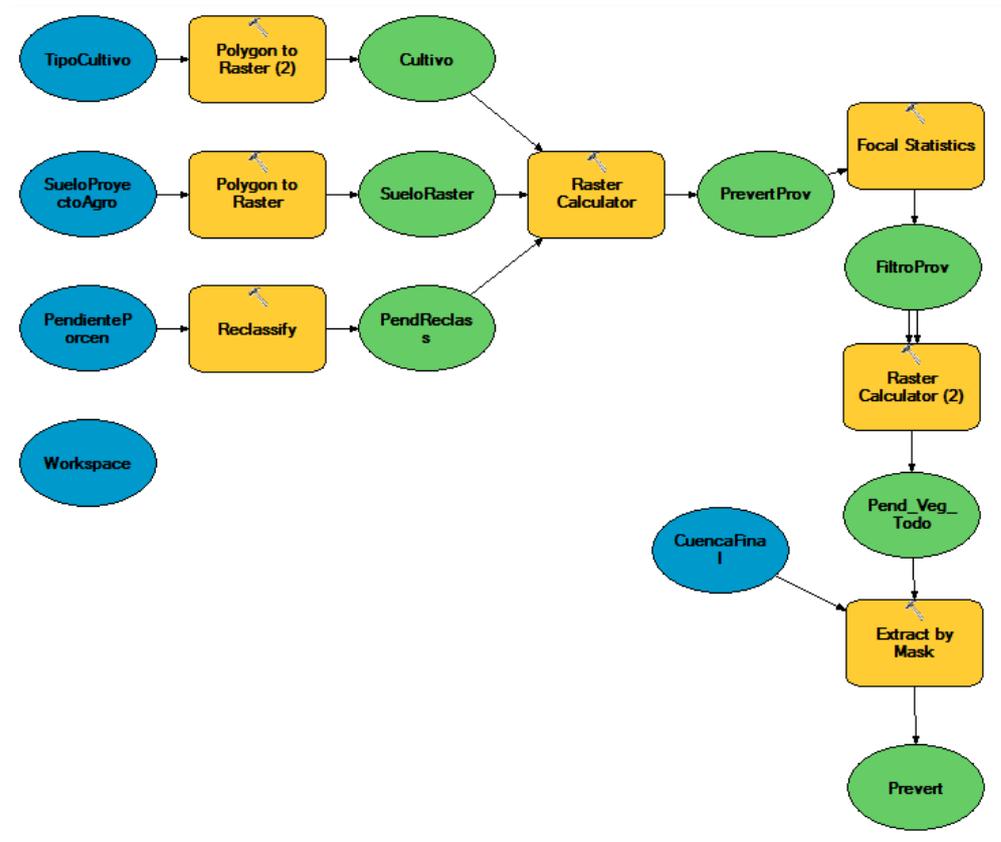
El proceso es similar al del método anterior, con la particularidad de que en este caso también se tiene en cuenta el tipo de suelo.

El problema con los bancales también es análogo, en este caso le daremos a la zona de bancales un coeficiente de 0,1 para zonas con suelo limoso-arenoso y de 0,15 para zonas con suelo limoso-arcilloso.

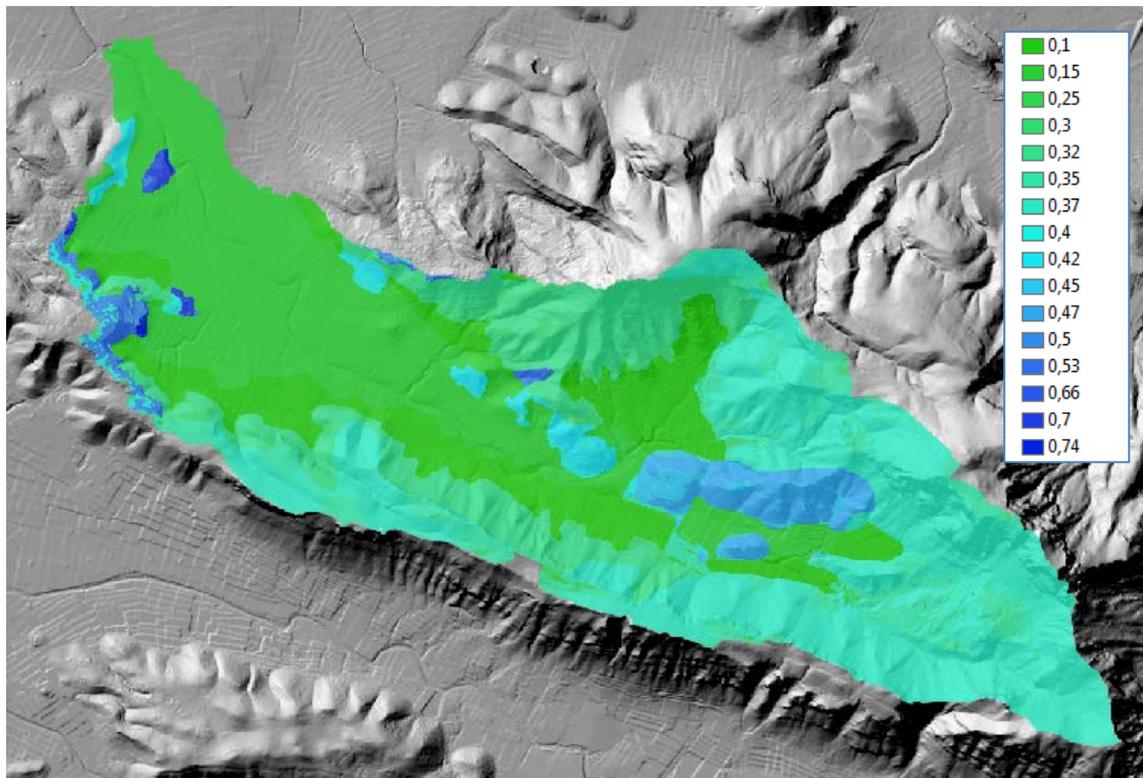
COEFICIENTE POR EL MÉTODO DE PREVERT				
Uso del suelo	Pendiente %	Textura del suelo		
		Arenoso-limoso	Limoso-arcilloso	Arcilloso
Bosque	0-5	0,10	0,30	0,40
	5-10	0,25	0,35	0,50
	10-30	0,30	0,40	0,60
	>30	0,32	0,42	0,63
Pastizal	0-5	0,15	0,35	0,45
	5-10	0,30	0,40	0,55
	10-30	0,35	0,45	0,65
	>30	0,37	0,47	0,68
Cultivo agrícola	Bancal	0,10	0,15	0,20
	0-5	0,30	0,50	0,60
	5-10	0,40	0,66	0,70
	10-30	0,50	0,70	0,80
	>30	0,53	0,74	0,84

Tabla de coeficiente de escorrentía por el método de Prevert modificada.

El proceso es muy similar al del método de Raws añadiendo como factor el tipo de suelo.



Proceso seguido para el cálculo del coeficiente de escorrentía por el método de Prevert.



Mapa de coeficiente de escorrentía calculado por el método de Prevert.

Valoración:

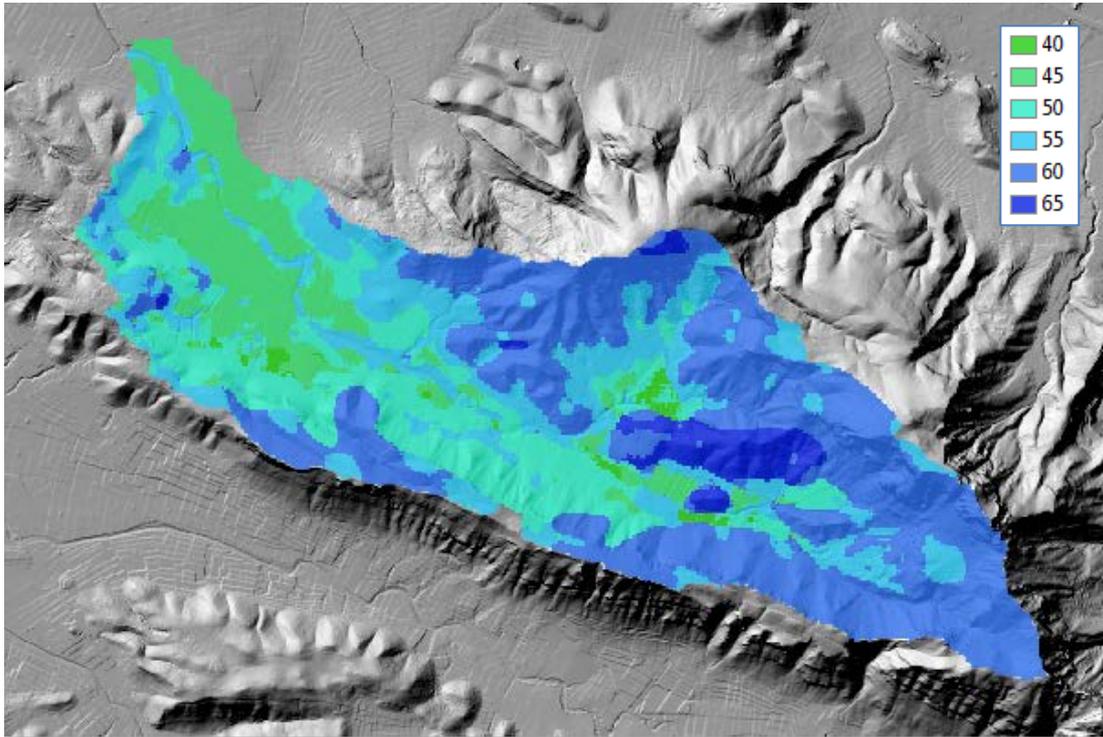
El resultado es bastante similar al de Raws con la salvedad de que al haberse considerado el tipo de suelo la zona de cultivo se divide ahora en dos áreas con diferente coeficiente, además la diferencia de coeficiente entre matorral y bosque ha disminuido.

3.3.2. Método de Cook o del sumatorio

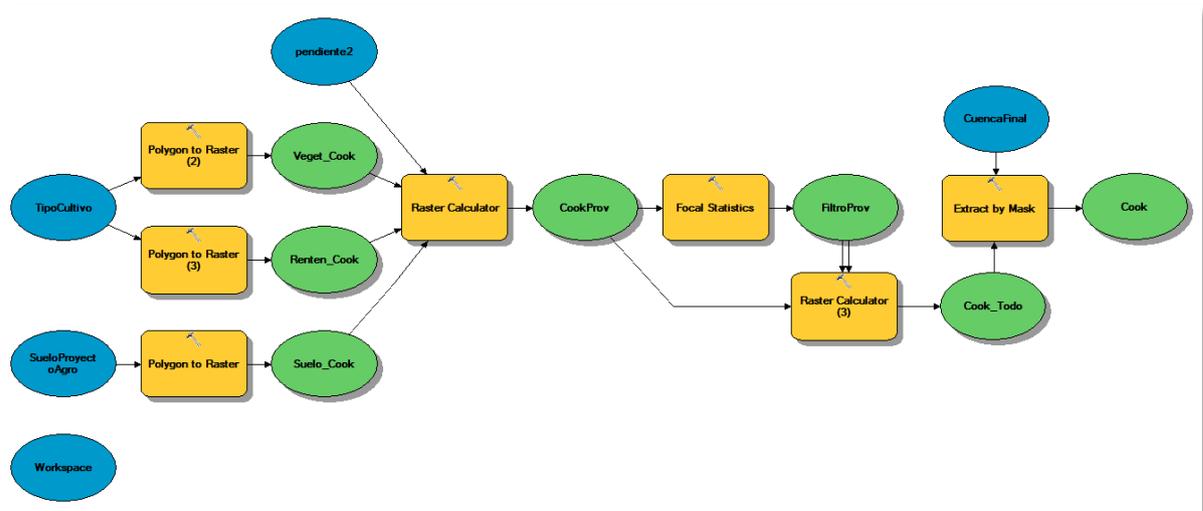
Como ya se dijo anteriormente este método no está pensado para áreas de más de 500 Ha por lo que para aplicarlo a esta cuenca necesitaríamos dividirla en al menos dos subcuencas, volver a unir esas cuencas para calcular un único valor de escorrentía total es un proceso bastante complejo, por ello se estudia el método para decidir si es o no útil.

Lo primero que tenemos en cuenta de este método es que no tiene en cuenta la intensidad de precipitaciones por lo que, si se ha calculado de forma empírica para valores muy distintos, no obtendremos buenos resultados.

En segundo lugar, nos encontramos con el mismo problema que en los casos anteriores, la existencia de bancales, algo para lo que el método no ha sido diseñado. Al tratarse de realizar un sumatorio no podemos aplicar al relieve el peso necesario respetando los fundamentos del método. Finalmente se decide descartarlo, aunque a continuación se incluyen el proceso de cálculo y el mapa de coeficientes resultante.



Mapa de coeficiente de escorrentía por el método de Cook.



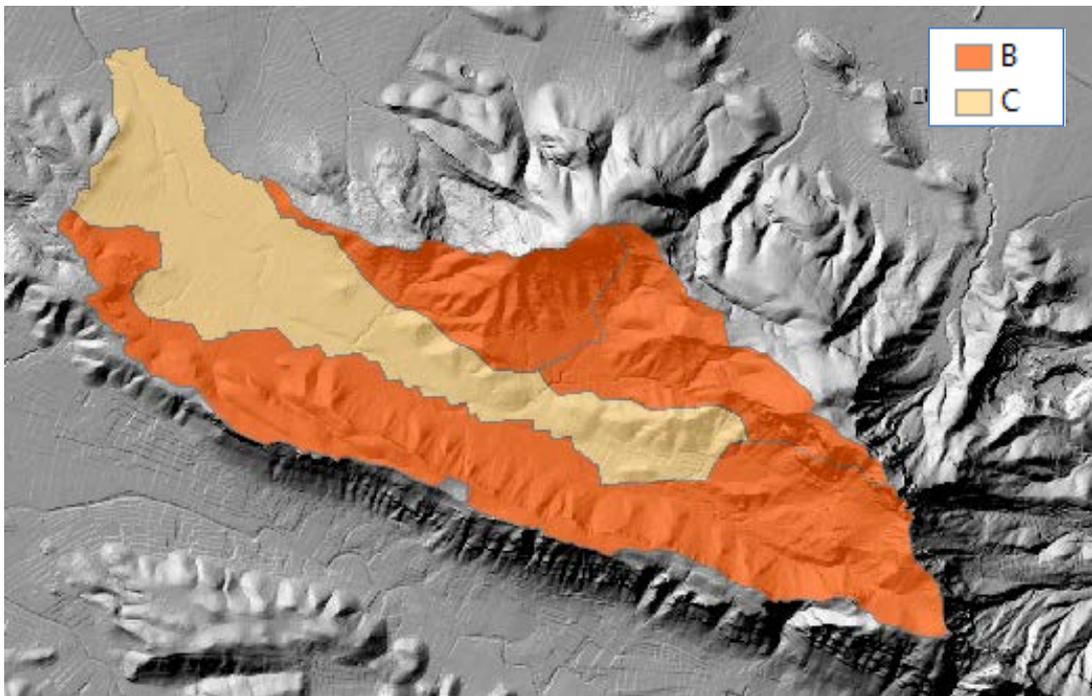
Proceso de cálculo del coeficiente de escorrentía por el método de Cook.

3.3.3. Cálculo del número de curva

Este método tiene en cuenta el tipo de suelo y la vegetación, así como el relieve, la humedad previa del suelo y otros factores como si los cultivos están o no alineados según la pendiente.

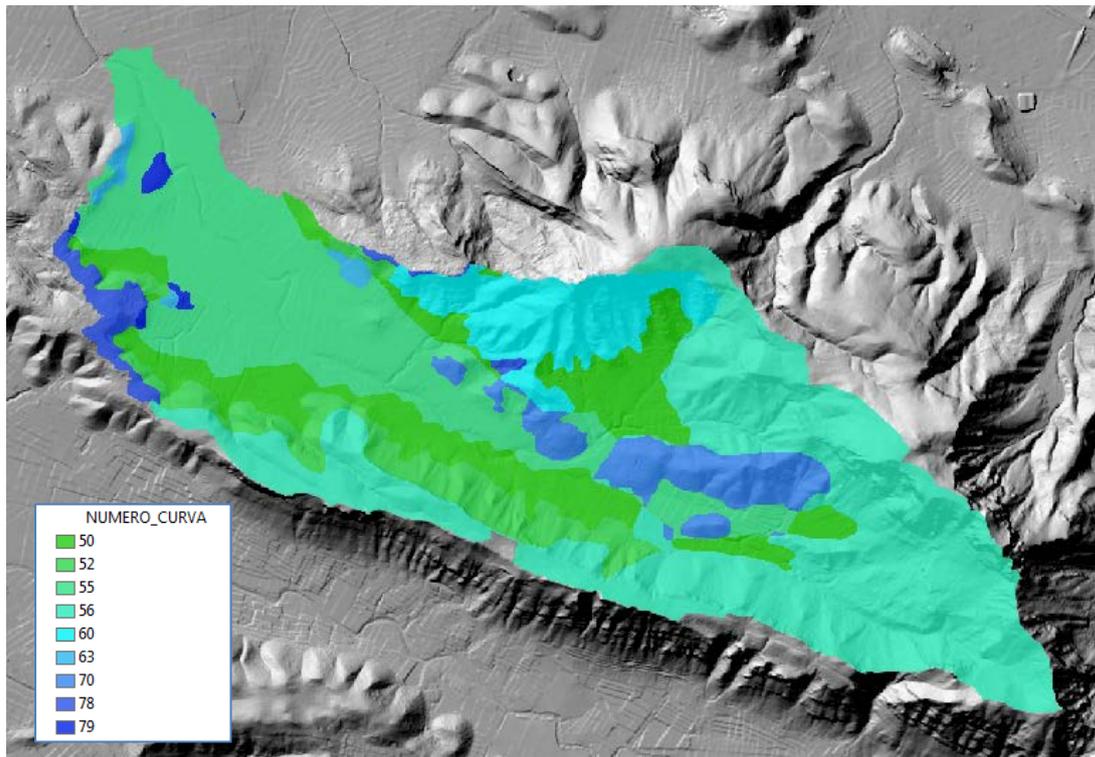
Existen gran cantidad de tablas que relacionan estos factores con el número de curva, cada tabla se adapta mejor a unas determinadas características.

El primer paso es definir el tipo de suelo, que, tal como se explicó anteriormente puede tomar hasta 4 valores diferentes, de la A a la D, siendo A el que genera menor escorrentía. La clasificación realizada distingue las mismas zonas que en el método de Prevert. Los niveles de permeabilidad son intermedios para toda la cuenca, por lo que solo existen valores B y C.



Mapa de clasificación del suelo para el método del número de curva.

En cuanto al resto de factores, se han estudiado varias tablas y se les han otorgado los valores que mejor coinciden con las características de cada zona. La excepción han sido, de nuevo, los bancales, para lo que se ha calculado un valor correspondiente a la baja escorrentía que generan.



Mapa de coeficiente de escorrentía calculado por el método del número de curva.

Valoración:

Este método es muy diferente de los anteriores por lo que no es de extrañar que el rango del número de curva sea muy distinto del rango del coeficiente de escorrentía (independientemente de que el primero vaya de 0 a 100 y el segundo de 0 a 1). Aun así la distribución es bastante similar.

3.3.4. Cálculo de valores finales de escorrentía por cada método

3.3.4.1. Cálculo del tiempo de concentración

El tiempo de concentración de una determinada cuenca es el tiempo necesario para que el caudal de salida de la misma se estabilice, esto ocurre cuando todos los puntos de la cuenca están aportando agua al punto de salida. Depende de característica como el área de la cuenca, la pendiente, la forma, etc.

En todos los métodos anteriores la intensidad o cantidad de precipitación va ligada al tiempo de concentración ya que la intensidad se considera siempre inversamente proporcional al tiempo que dura la tormenta.

El tiempo de precipitación puede calcularse por varios métodos. Algunos de los más usados son los siguientes:

- **Bransby-Williams**

$$T = \frac{L}{1,5 D} \sqrt[5]{\frac{M^2}{F}}$$

Siendo

T= Tiempo de concentración en horas.

L= Distancia máxima a la salida.

D= Diámetro del círculo de área equivalente a la de la cuenca en km.

M= Área de la cuenca en km²

F= Pendiente media del cauce principal en porcentaje.

- **Kirpich**

$$T = 0,02L^{0,77} S^{-0,385}$$

Siendo:

T= tiempo de concentración en minutos.

L= longitud máxima a la salida en metros.

S= Pendiente máxima del lecho.

- **Dirección general de carreteras**

Esta fórmula es una modificación de la del US Army Corps of Engineers, adaptada al territorio nacional, por lo que se considera una de las más fiables para la zona de estudio.

$$t_c = 0,3 \left(\frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0,76}$$

Siendo:

T= Tiempo de concentración en horas.

J= Pendiente del cauce principal.

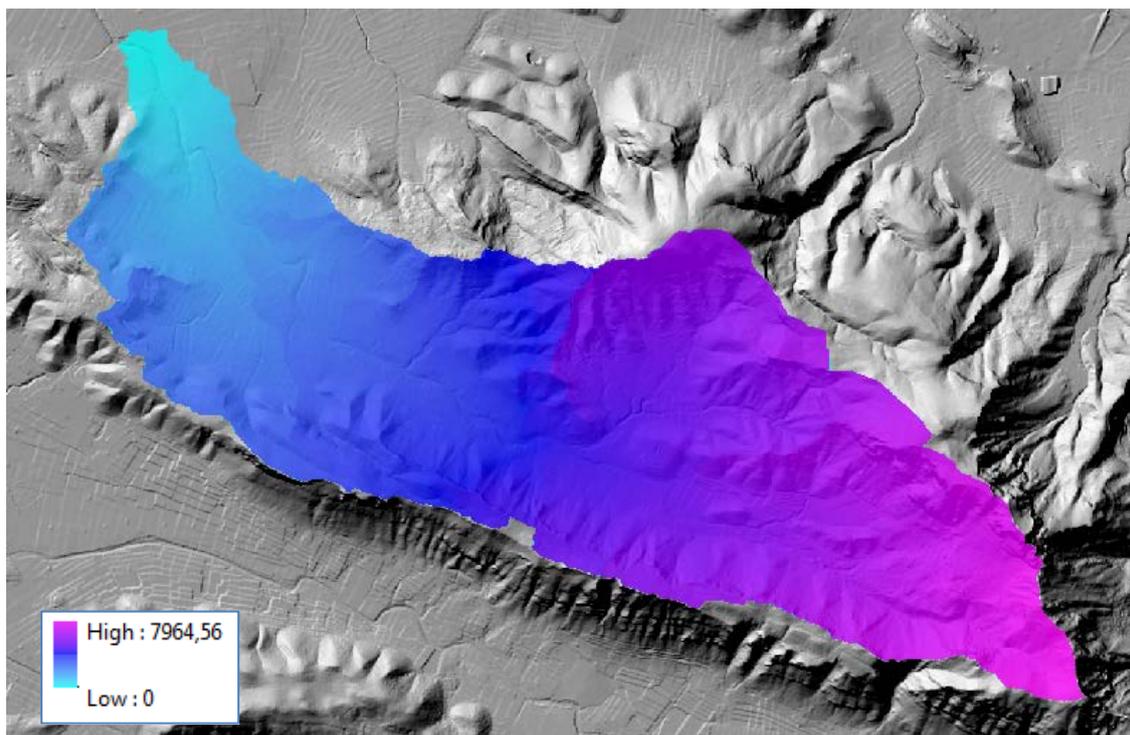
H= Diferencia de nivel entre el punto de desagüe y el punto hidrológicamente más alejado.

L= Longitud del cauce principal en km.

También se han tenido en cuenta otros métodos de cálculo como Agres, De Cormack, Passini y Giandotti, pero se ha decidido no utilizarlos al no adaptarse bien a las características de la cuenca. Por ejemplo, el método de Agres solo tiene en cuenta el área de la cuenca, lo que lo hace poco útil para cuencas de características diferentes a aquellas para las que se ha calculado. Además, solo está pensado para cuencas de más de 1000 Ha.

Como puede verse, para el cálculo del tiempo de concentración, necesitamos conocer la longitud del cauce principal. Este es un parámetro bastante complicado y existen varias formas de obtenerlo, en este caso el problema se ha simplificado mucho y se ha obtenido directamente con la herramienta "Flow length" de ArcGIS, si bien hay que mencionar que con ella no siempre se obtienen los mejores resultados.

El resultado de esta herramienta es un raster en el que cada píxel tiene por valor la distancia que recorre el agua desde ese píxel hasta el punto de desagüe.



Mapa de distancia hidrológica al punto de desagüe.

Se calcula el tiempo por los tres métodos y se ve que los resultados son bastante similares, dado que ninguna metodología parece destacar existen dos opciones: tomar como valor final la media de los tres o bien utilizar la más desfavorable, que sería la que más escorrentía genere. Finalmente se decide utilizar el valor medio de los tres calculados.

Tiempo de concentración			
Área	829,62	Ha	8296200 metros ²
Longitud cauce principal	7964,56	metros	
Altitud mínima	38,75	msnm	
Altitud máxima	580,24	msnm	
Diferencia altitud	541,49	metros	
Diámetro circunferencia de mismo área	3250,08	metros	
Pendiente cauce principal	0,07	m/m	
Pendiente cauce principal	6,80	%	
KIRPICH			
T	139,70	minutos	
BRANSBY-WILLIAMS			
T	2,60	horas	
	155,74	minutos	
DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS			
T	2,42	horas	
	145,21	minutos	
T medio			
	146,88	minutos	

Tabla de cálculo del tiempo de concentración.

3.3.4.2. Cálculo de la intensidad en función del tiempo. Fórmula de Témez

La intensidad de precipitaciones que se ha calculado anteriormente es la correspondiente a un período de 24 horas, ya que este es el periodo en el que normalmente se mide la precipitación. En cambio, para el cálculo de la escorrentía el dato que necesitamos es de la intensidad que tendría una tormenta de duración igual al tiempo de concentración, ya que sería la que mayor escorrentía generase. Una tormenta de duración menor no duraría el tiempo suficiente para que todos los puntos de la cuenca aportasen agua a su salida, mientras que una de duración mayor, tendría una intensidad menor, sabiendo que, normalmente, a mayor intensidad, menor duración y viceversa.

Uno de los métodos más empleados para el cálculo de la intensidad de precipitaciones en un tiempo determinado a partir del valor en 24 horas es la fórmula de Témez:

Para nuestra zona tomaremos el valor 12. Lo que de acuerdo con la fórmula de Témez significa que la intensidad de una precipitación que dura 1 hora es 12 veces la intensidad de una precipitación que dure un día entero.

Utilizando esta formulación podemos obtener la cantidad de lluvia para el tiempo de concentración y un tiempo de retorno de 25 años.

INTENSIDAD PRECIPITACIONES 25 AÑOS		
Valor [mm/día]	Nº píxels	Valor*NºPixels
200,832	85	17070,72
207,108	6872	1423246,176
211,292	18719	3955174,948
217,568	11197	2436108,896
Total	36873	7831600,74

Intensidad precipitaciones 24h	8,85	mm
Intensidad precipitaciones 1h	106,20	mm
Cantidad lluvia en el tiempo de concentración	144,52	mm

3.3.4.3. Resultados

Una vez tenemos los coeficientes de escorrentía de cada píxel así como los valores de intensidad de precipitaciones para el tiempo de concentración podemos calcular la escorrentía generada.

Dado que hemos obtenido un valor de coeficiente de escorrentía o número de curva para cada píxel restaría obtener el valor general para toda la cuenca por cada uno de los métodos. Para ello se calcula la media del coeficiente, ponderado en función del número de píxels. Si se hubiese realizado de manera clásica, dividiendo el área en zonas homogéneas se obtendría este coeficiente final ponderando en función del área de cada una.



RACIONAL RAWs		
Coeficiente	Nº píxels	Coef*Nºpíxels
0,36	22610	8139,6
0,42	113340	47602,8
0,18	4501	810,18
0,21	51490	10812,9
0,6	6035	3621
0,72	2848	2050,56
0,1	131011	13101,1
Total	331835	86138,14

Coeficiente final 0,26
Escorrentia 35,31 m3/s

RACIONAL PREVERT		
Coeficiente	Nº píxels	Coef*Nºpíxels
0,7	943	660,1
0,74	326	241,24
0,15	84497	12674,55
0,3	2468	740,4
0,35	24256	8489,6
0,37	94051	34798,87
0,25	79	19,75
0,4	4185	1674
0,45	3728	1677,6
0,47	11156	5243,32
0,5	3337	1668,5
0,66	419	276,54
0,1	47166	4716,6
0,32	43568	13941,76
0,53	1980	1049,4
Total	322159	87872,23

Coeficiente final 0,27
Escorrentia 37,11 m3/s

COOK O SUMATORIO		
Coeficiente	Nº píxels	Coef*Nºpíxels
40	390	15600
45	4871	219195
50	7162	358100
55	7942	436810
60	14948	896880
65	1554	101010
Total	36867	2027595

Coeficiente final 55,00

NÚMERO DE CURVA		
Coeficiente	Nº píxels	Coef*Nºpíxels
56	120707	6759592
70	15248	1067360
52	22602	1175304
63	2772	174636
78	7045	549510
79	1800	142200
50	47138	2356900
55	83923	4615765
60	26210	1572600
70	4402	308140
Total	331847	18722007

Coeficiente final	56,42
S	196,21

Q	36,76 mm
Escorrentía	34,60 m ³ /s

Tal como se mencionó anteriormente, el valor de salida del método del número de curva no es un valor de escorrentía si no un valor de altura de lámina de agua, es decir, la altura que alcanzaría el agua para toda la cuenca si no hubiese ningún tipo de escurrimiento y hubiese llovido durante un tiempo igual al tiempo de concentración.

Para calcular el valor de escorrentía a partir del valor de altura de la lámina de agua calcularemos el volumen total de agua correspondiente a dicha altura de lámina y que la escorrentía es constante durante toda la tormenta. Esto último cual no deja de ser una aproximación, ya que el caudal varía durante la tormenta, siendo cero al comienzo de la misma. El cálculo preciso de la evolución del caudal en el tiempo sería objeto de un estudio mucho más extenso.

RESUMEN DE RESULTADOS		
Método	Coeficiente de escorrentía/ Número de curva	Escorrentía generada [m ³ /s]
Fórmula racional-Raws	0,26	35,31
Fórmula racional-Prevert	0,27	37,11
Cook o sumatorio	55,00	No calculado
Número de curva	56,42	34,60

Debemos entender en la tabla que el número de curva es similar al coeficiente de escorrentía multiplicado por 100.

3.3.5. Valoración de los resultados

Puede verse a simple vista que los coeficientes de escorrentía son muy diferentes del número de curva. Esto es debido a las diferencias en el cálculo de los métodos empíricos, ya que en principio ambos valores son la relación entre lluvia caída y escorrentía generada, sin embargo al analizar las tablas de los diferentes métodos veremos claramente que para mismas características se obtienen valores son muy diferentes.

A pesar de las diferencias de coeficientes estos se ven compensados con sus respectivas fórmulas de cálculo de escorrentía, de tal forma que los valores de escorrentía calculados por los tres métodos son muy similares.

El hecho de que las escorrentías sean tan similares es una buena señal, ya que nos sugiere que los cálculos por los distintos métodos han sido coherentes.

Una de las mayores fuentes de error del puede ser la atribución de valores de escorrentía a la zona de bancales, ya que ha tenido que hacerse de manera aproximada estudiando cada método, sin que haya sido posible acudir a campo y realizar las mediciones convenientes. Si bien no puede comprobarse con datos reales, si puede verse que los valores asignados han sido coherentes en todos los métodos.

4. Conclusiones

Ha quedado de manifiesto la idoneidad del uso del SIG para este tipo de procesos, ya que permite automatizar en gran medida el proceso y, sobre todo, aumentar significativamente la cantidad de información con la que se trabaja. Esto significa obtener un resultado, que aunque sigue teniendo bases empíricas, utiliza mayor cantidad de información y por tanto puede ofrecer mejores resultados.

No se debe perder de vista que para ciertos aspectos es necesario tener un enfoque más general que el que se otorga estudiando el terreno píxel a píxel.

Hay que destacar que existe una falta de metodología adaptada a la zona de estudio, esto se ha visto reflejado en los cambios que ha sido necesario realizar en los métodos.

Como hemos mencionado anteriormente los datos obtenidos tienen aplicabilidad directa, pero también sería posible su utilización como datos de entrada en otros estudios posteriores, como por ejemplo en modelos de transporte de sedimentos o de contaminación.

Como vías abiertas para la mejora del presente trabajo podemos mencionar una mayor automatización en los procesos, pero sobre todo un estudio más profundo de determinados factores de hidrología que se han solventado aquí de manera muy superficial, como son el cálculo de la longitud de flujo de la cuenca y la evolución del caudal de escorrentía en el tiempo para el método del número de curva. Por supuesto, también sería objeto de mejora un posible trabajo de campo para la determinación de la pendiente real de los bancales y la escorrentía que se genera en ellos.

5. Bibliografía

- Rafael Dal-Re Tenreiro, 2003. *Pequeños embalses de uso agrícola*.
- Ministerio de Fomento, Dirección General de Carreteras, 1999. *Máximas lluvias diarias en la España Peninsular*.
- Ibañez Asensio, Sara; Moreno Ramón, Héctor; Gisbert Blanquer, Juan Manuel. *Métodos para estimar la escorrentia de una cuenca de pequeño tamaño*.
- Ibañez Asensio, Sara; Moreno Ramón, Héctor; Gisbert Blanquer, Juan Manuel. *Estima de precipitaciones máximas por el método de Gumbell*.
- Ibañez Asensio, Sara; Moreno Ramón, Héctor; Gisbert Blanquer, Juan Manuel. *Métodos para la estimación del coeficiente de escorrentia*.
- Ibañez Asensio, Sara; Moreno Ramón, Héctor; Gisbert Blanquer, Juan Manuel. *Métodos para la determinación del tiempo de concentración de una cuenca hidrográfica*.
- Martínez Ramírez, Rosa Ana, 2004. *Mapa de suelos interactivo de la hoja Topográfica de Alzira*.
- López Cadenas de Llano F., director, Varios Autores; (1994, 1998) *Restauración Hidrológico-Forestal de cuencas y Control de la erosión*.
- Francés García F., 1997 *Delimitación del riesgo de inundación a escala regional en la Comunidad Valenciana*.

