

# MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA ESCORRENTÍA EN VERTIENTES DE LITOLOGÍA NO ACUÍFERA EN ÁMBITOS MEDITERRÁNEOS

J.D. RUÍZ SINOGA, J.J. DELGADO PEÑA, O. GALÁN ARNAL,  
J.F. MARTÍNEZ MURILLO, A. NÚÑEZ CORTÉS, F. E. BUENO SANTOS,  
L. CALVO DELGADO, A. GALLEGOS REINA, B. LUCAS  
SANTAMARIA, J. MÁRQUEZ CARRERO, M. NAVARRO  
VILLANUEVA, M.J. NOGUERA ROBLES, G. RAMÍREZ ROMÁN,  
A.R. ROMERO LOPERA, E.J. RUÍZ ALCÁNTARA

## RESUMEN

El estudio del comportamiento hidrológico de las vertientes ha sido y es un tema muy recurrente tanto desde la óptica hidrológica como de la hidrodinámica, a lo largo de las últimas décadas. Los trabajos de Ven te Chow, (1994); Ward&Robinson, (2000); Horton, (1945); Hewlet, (1967); Smith (1970); Laveeh, (1998); Yair (1985); constituyen buenos ejemplos de la necesidad de explicación de los mecanismos de incorporación del agua a los cauces, así como de la variabilidad espacio-temporal de los mismos. Esta preocupación se incrementa en ambientes donde los ecosistemas adquieren una mayor diversidad con incidencia diferencial de los factores bióticos y abióticos y, en consecuencia, con una diversa respuesta hidrológica. Uno de estos ambientes es el mediterráneo, a caballo entre los climas áridos y los templado-húmedos, con repercusiones directas en el sistema ecogeomorfológico y en el comportamiento hidrológico. Y en este sentido, ha sido comúnmente aceptada la teoría de un mecanismo propio de generación de escorrentía en laderas bajo condiciones mediterráneas, diferente a los existentes en otros ambientes: el denominado modelo hortoniano discontinuo o mixto. La presente investigación pretende, desde la óptica hidrológica y aceptando principios hidrodinámicos propios de condiciones mediterráneas, establecer los mecanismos de ajuste entre ambas aproximaciones. Y una vez determinados ambos modelos, compararlos con los resultados de la experimentación in situ, realizando los ajustes entre ambas aproximaciones, a fin de validar el método. Todo ello aplicado en dos vertientes de exposición opuesta en los Montes de Málaga.

### ABSTRACT

The study of the slopes hydrological behavior has been and is a very recurrent subject as much from the hydrological as of the hydrodynamics optics, throughout the last decades. The works of Ven Te Chow, (1994); Ward&Robinson, (2000); Horton, (1945); Hewlet, (1967); Smith (1970); Laveeh, (1998); Yair (1985); they constitute good examples of the necessity of explanation of the mechanisms and the relationships between surface water and channels, as well as of the timing and spatial variability of such. This preoccupation is increased in environments where the ecosystems acquire a greater diversity with differential response of the biotics and abiotics factors and, consequently, with a diverse hydrological answer. One of these environments is the Mediterranean, located between arids and humids climates with direct repercussions in the ecogeomorfological system and the hydrological behavior. And in this sense, commonly, the theory of a mechanism own of generation of slope run-off has been accepted under Mediterranean conditions, different from the existing ones in other environments: the denominated discontinuous or mixed hortonian model. This paper tries, from the hydrological optics and accepting the hydrodynamics principles of Mediterranean conditions, to establish the adjustment gears between both approaches. And once determined both models, to compare them with the results of the field experimentation, and to make the adjustments between both approaches, in order to validate the method. All applied it in two slopes of opposed orientation in middle mountains of Malaga.

## 1. HIPÓTESIS INICIALES

El estudio del comportamiento del agua en las laderas, así como en el suelo y sus interacciones dentro de lo que se ha denominado sistema ecogeomorfológico, es decir, sus relaciones con la vegetación y el suelo y las posibles consecuencias erosivas de los procesos hídricos, ha suscitado un gran interés desde el campo de la investigación científica.

Sin embargo, la forma de abordar dicha investigación ha adquirido siempre diferentes enfoques. La hidrología tradicional se preocupó más de los volúmenes de escorrentía que se concentraban en los cauces en forma de caudal, tanto sólidos como líquidos. Y la rama de la geomorfología encargada del estudio de los fenómenos hídricos, la hidrodinámica, se acercó más a los procesos que determinaban la generación de escorrentía, las características de la misma y sus consecuencias sobre las vertientes

La hidrología tradicional basa sus estudios en una serie de metodologías y ecuaciones matemáticas para el cálculo de los caudales líquidos y sólidos en cauces para cuencas hidrográficas. Los métodos matemáticos incluyen desde aquellos que pretenden completar las series de datos insuficientes, hasta los que simulan posibles situaciones basándose en modelos predeterminados (Mintegui, 1990).

La hidrodinámica adopta un posición más experimental mediante la medición directa en campo de unas variables físicas e hídricas, totalmente

interrelacionadas, y de cuyas interacciones quedará determinado el comportamiento hidrodinámico de la ladera, luego su volumen de escorrentía y, por tanto, la modalidad de su generación, es decir, el modelo de generación de escorrentía.

En condiciones naturales homogéneas, húmedas o secas, sin excesiva variabilidad espacio-temporal, la correlación entre ambos métodos o aproximaciones es más o menos adecuada, pero en ecosistemas mediterráneos, la inexistencia de un claro modelo de generación de escorrentía, podría suponer diferencias en el ajuste entre ambas aproximaciones

Con la investigación que presentamos en este artículo, pretendemos averiguar el ajuste existente entre ambas metodologías, así como su comparación con métodos experimentales, es decir, cuantificar y cualificar la generación de escorrentía a lo largo de dos laderas de orientación opuesta utilizando una aproximación desde la hidrología tradicional y otra desde la hidrodinámica. La determinación de la validez de las dos metodologías y los factores determinantes en la generación de la escorrentía, así como las variaciones espacio-temporales de ésta, nos puede acercar a un mejor conocimiento de la raíz de uno de los fenómenos de mayor relevancia para el medio mediterráneo: los fenómenos torrenciales, la generación de avenidas y sus consecuencias erosivas, en cuanto a la desertificación o pérdida de productividad del suelo en un medio tan humanizado y alterado como es el mediterráneo.

Tras elegir una zona de estudio, con dos laderas de orientación opuesta, con unas determinadas características topográficas, edáficas y de vegetación que en el siguiente apartado serán expuestas, pasamos a realizar un trabajo previo a la aplicación de las metodologías hidrológicas e hidrodinámicas. Este trabajo consistió en la delimitación, fotografiado, fotointerpretación, y levantamiento topográfico de las laderas a estudiar.

Una vez realizado lo anterior, pasamos aplicar en primer lugar la metodología hidrológica acudiendo al Método del Número de Curva del *United Soil Conservation Service* de los Estados Unidos.

El Método del Número de la Curva se basa en la estimación directa de la escorrentía superficial de una lluvia aislada, a partir de las características del suelo, uso del mismo y de su cubierta vegetal. El método supone que cada uno de los complejos suelo-vegetación se comporta de una misma forma frente a la infiltración.

En un complejo suelo-vegetación totalmente impermeable, toda la precipitación se convierte en escorrentía superficial. Por el contrario, un complejo totalmente permeable no generaría escorrentía fuera cual fuere el valor de la precipitación. Entre estos dos casos extremos podemos tener infinitas respuestas de escorrentía superficial ante una precipitación, según el tipo de asociación suelo-vegetación, las características hidrológicas de los suelos y su grado de humedad.

Cada una de las curvas intermedias que ofrece la evolución temporal de la escorrentía, consta de dos partes diferenciadas: una, el valor umbral de precipitación ( $P_0$ ) por debajo del cual toda precipitación es interceptada por el complejo suelo-vegetación y, por tanto, la escorrentía superficial es nula. Superado el valor de  $P_0$ , entramos en la segunda parte de la curva en la cual el valor de la escorrentía en relación con la precipitación va aumentando. Finalmente, llegando a valores muy altos de la precipitación, la curva tiende asintóticamente a una inclinación de tangente igual a la unidad. Esto significa que, para valores muy altos de precipitación, el suelo está tan saturado de agua que un incremento de lluvia se traduce en un incremento de la misma magnitud de la escorrentía.

A cada tipo de complejo suelo-vegetación se le asigna un valor, llamado Número de Curva o Número Hidrológico, que define sus condiciones hidrológicas. Para esta asignación utilizamos una tabla en la que quedan recogidas las principales asociaciones suelo-vegetación y usos dados al territorio (Tabla tradicional y tabla publicada por Ponce en 1989).

Los suelos se clasifican en uno de los cuatro grupos siguientes:

- Grupo I: es el que ofrece menor escorrentía. Incluye los suelos que presentan mayor permeabilidad, incluso cuando están saturados. Comprende los terrenos profundos, con predominio de arena o grava y con muy poco limo o arcilla.
- Grupo II: incluye los suelos de moderada permeabilidad cuando están saturados, comprendiendo los terrenos arenosos menos profundos que los del Grupo I, aquéllos otros de textura franco-arenosa, de mediana profundidad y los francos profundos.
- Grupo III: incluye los suelos que ofrecen poca permeabilidad, cuando están saturados.
- Grupo IV: es el que ofrece mayor escorrentía. Incluye los suelos que presentan gran impermeabilidad, tales como los terrenos muy arcillosos profundos con alto grado de tumefacción, los terrenos que presentan en la superficie o cerca de la misma una capa de arcilla muy impermeable y aquellos otros con subsuelo muy impermeable próximo a la superficie.

En cuanto a la cubierta vegetal, se establecen distintas clases en sus condiciones hidrológicas, con gradaciones de pobres a buenas para la infiltración. Cuanto más denso es el cultivo, mejor es su condición hidrológica para la infiltración y menor es el valor de número N, representativo de la escorrentía.

Debe tenerse en cuenta en el estudio de la escorrentía el estado de humedad del suelo previo a la lluvia: considerando la cantidad de lluvia caída en el período de los cinco días anteriores, estableciéndose tres clases de situaciones con dicha cantidad.

CONDICIÓN: Lluvia total caída durante los cinco días anteriores.

	Período húmedo (Oct-Mar)	Período seco (Abr-Sep)
I	< 12,5 mm	< 35.5 mm
II	12,5 a 28 mm	35,5 a 53 mm
III	> 28 mm	>53 mm

Una vez establecido el número de curva correspondiente, pasamos a calcular el volumen de escorrentía por medio de una serie de formulaciones. Según aumenta la precipitación, la diferencia ( $P - Q_e$ ), donde  $P$  es la precipitación y  $Q_e$  es el caudal de escorrentía, tiende a un valor constante  $S$ , que representa la máxima infiltración.

Si denominamos  $F$  a la infiltración que se ha producido una vez superado el umbral de escorrentía:  $F$  o  $F_a = P - P_0 - Q_e$

Y  $P_e$  la precipitación efectiva:  $P_e = P - P_0$

Las cantidades  $P$ ,  $Q_e$ ,  $F$  y  $P_0$  (o  $F_a$ ), se representan en función del tiempo  $T$ , como ordenadas de las curvas correspondientes.

El *US Soil Conservation Service* admite experimentalmente que  $F / S = Q_e / P_e$ , expresión que puede escribirse como:

$$P - P_0 - Q_e / S = Q_e / P - P_0, \text{ de donde } Q_e = (P - P_0)^2 / P - P_0 + S$$

De la observación de numerosas cuencas el USSCS ha deducido que:  $P_0 = 0,2 \cdot S$ . Por ello, se obtiene:  $Q_e = (P - 0,2 \cdot S)^2 / P + 0,8 \cdot S$

Para la obtención del valor  $S$  se utiliza el número de curva correspondiente:

$$S = 254 \cdot (100 / N - 1), \text{ en mm.}$$

De esta forma, podemos obtener la escorrentía superficial  $Q_e$  en mm que produce una lluvia de  $P$  mm sobre un complejo suelo-vegetación identificado con un número de curva  $N$ . Si además del valor total de la precipitación  $P$ , disponemos de su distribución temporal, podremos repartir la escorrentía  $Q_e$  total a lo largo del tiempo que dura la precipitación.

Esta sería la aproximación hidrológica al comportamiento del agua en la ladera. Cabe plantear si estos indicadores son aplicables a condiciones mediterráneas, en donde las áreas generadoras o infiltradoras se suceden a lo largo de la ladera, según nuestras hipótesis.

El caudal que recorre la red de drenaje de una cuenca hasta la desembocadura, es el resultado de la concentración organizada en los cauces del flujo superficial y subsuperficial del agua circulante, a lo largo de una serie de lade-

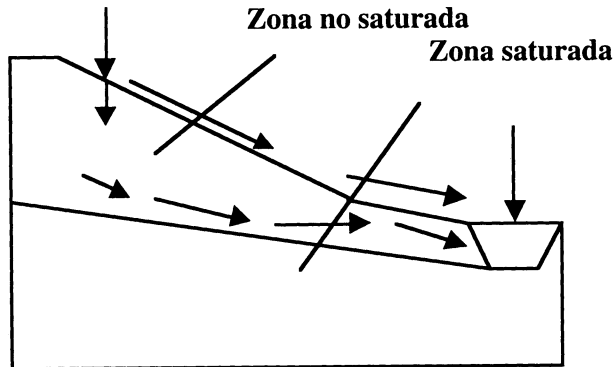
ras. El agua que circula por la ladera se denomina *escorrentía*, cuya modalidad atenderá a un determinado modelo dependiendo de las características del sistema ecogeomorfológico de la misma. Se trata por tanto, de un proceso fundamental en el conjunto del ciclo hidrológico dado que alimenta a las redes de drenaje y controla un apartado muy importante en la dinámica de los procesos erosivos, derivados de la acción del agua como agente.

Una vez que llega el agua de la precipitación a la superficie de la ladera, desde el punto de vista hidrológico pueden producirse dos actuaciones. De un lado, una *escorrentía* inmediatamente posterior al evento lluvioso o durante el mismo, que comienza a circular a lo largo de la ladera. Por otro lado, el agua infiltrada que genera un flujo subsuperficial más lento que la anterior (Ward y Robinson, 2000). Esta doble modalidad de comportamiento del agua en la ladera originó la elaboración de una serie de modelos que explicaban su generación, de entre los cuales destacan dos: el modelo de flujo superficial de Horton y el modelo de flujo subsuperficial o *escorrentía* por exceso de saturación.

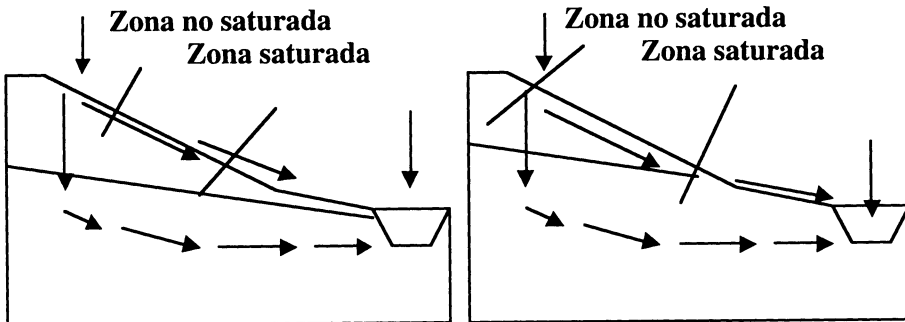
Por un lado, el modelo de Horton (1945) o de flujo superficial considera una lámina de agua cuyo espesor aumenta vertiente abajo; la lámina de agua aparece cuando la intensidad de la precipitación supera a la capacidad de infiltración del suelo. Distingue tres zonas en la ladera: una superior sin erosión, la intermedia con erosión activa, y otra inferior donde existe sedimentación de los finos arrastrados por las aguas ladera abajo. Parece predominar en climas áridos y semiáridos (suelos poco profundos) y durante las crecidas (de Pedraza, 1996).

Por otro, el modelo de Hewlett (1967) de flujo subsuperficial o *escorrentía* por exceso de saturación considera que en la parte superior de la ladera, y debido a contrastes de permeabilidad, existe un interflujo inicialmente oblicuo (por infiltración) y luego paralelo a la superficie según el gradiente del terreno. Esto supone que el agua se concentre y exfiltre en la parte inferior de la ladera, provocando su saturación, a la que habrá que unir la *escorrentía* superficial generada en esa zona por incapacidad de infiltración. Frente al anterior, éste sucede en climas templado-húmedos y suelos de cierto espesor (de Pedraza, 1996).

**FIGS. 1, 2 Y 3:  
MODELOS CLÁSICOS DE GENERACIÓN DE ESCORRENTÍA.**



**Modelo de Horton.(1945)**



**Modelo de Hewlett. (1967)**

Fuente: Elaboración propia.

Estos dos modelos son los clásicos en la hidrodinámica de laderas pero existen muchos otros. Sin embargo, todos ellos fueron elaborados en ambientes de características muy marcadas y uniformes, como pueden ser los climas oceánicos (Hewlett, 1967) y desértico o subdesértico (Horton, 1945). Y es en este sentido donde encontramos el primer problema para abordar el estudio de la generación de escorrentía en laderas en ambientes mediterráneos.

El clima mediterráneo se encuentra situado entre los climas áridos tropicales secos y los templado húmedos, de forma que la variabilidad a lo largo de un gradiente pluviométrico dentro del mismo es amplia, pudiendo observar paisajes muy diferentes, por variaciones en el régimen pluviométrico, oscilan-

do entre aquéllos con precipitaciones que superan los 800 y 1000 mm anuales, a los más áridos del desierto, con menos de 200 e incluso 100 mm al año, pasando por toda una gama de paisajes que oscilan en el intervalo de 300/400 a 600/700 mm anuales.

A priori, podemos pensar que en condiciones mediterráneas, no es posible que la escorrentía se origine de igual forma en cualquier punto del mismo, atendiendo a un modelo único, puesto que la variabilidad climática implica la variabilidad en los factores bióticos y abióticos que influyen en toda la dinámica hidrológica.

Esto nos lleva a concluir que la generación de la escorrentía, está obviamente relacionada con el estado en el que se encuentra el sistema ecogeomorfológico, y de la diferente incidencia de los elementos bióticos y abióticos en el mismo. A su vez, este sistema variaría en función del régimen pluviométrico que le afecte.

Por tanto, el modelo de generación de escorrentía no respondería exactamente ni al de Horton ni al de Hewlett en el medio mediterráneo, sino que se trataría de una situación en la cual, por la configuración de los factores bióticos o abióticos de la ladera, por el patrón de vegetación en la misma, dicha generación de escorrentía atendería a un modelo mixto de áreas infiltradoras y contribuyentes, que podríamos denominar hortoniano discontinuo, como plantea Calvo Cases, o como se acepta en la literatura geomorfológica: *accepting / contributing areas*, o *source/sink areas*.

Aceptando estos planteamientos, se trata de ajustar los métodos hidrológicos al supuesto comportamiento hidrodinámico, a fin de comparar los hidrogramas de escorrentía resultantes, y compararlos con resultados obtenidos mediante experimentación en campo. Es decir, que asumiendo a lo largo de una ladera la existencia de áreas emisoras e infiltradoras, tratamos de integrar tal comportamiento en función de las variables hidrológicas determinadas mediante los métodos descritos.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

Las dos laderas elegidas para llevar a cabo la investigación, se localizan en la unidad natural de los Montes de Málaga, en el sur de la Península Ibérica, formando parte de las Cordilleras Béticas. Concretamente, las dos vertientes se encuentran en la cabecera de la cuenca del arroyo del Aneón (afluente de la margen izquierda del río Guadalhorce), y a unos 4 Km. al Oeste de la localidad malagueña de Almogía.

La morfología que caracteriza a ambas laderas y su entorno, es semejante al modelado que conforma los Montes de Málaga: topografía muy comparti-



mentada, con pendiente elevada hacia el fondo de los valles y formas alomadas, más suaves hacia las cimas. El sustrato geológico sobre el que actúa el agua para elaborar este modelado, queda constituido por el Complejo Maláguide, el manto de corrimiento más superficial de los tres que constituyen las Unidades Internas de las Béticas, siendo su litología de carácter metamórfico -en el caso de la zona de estudio son filitas carboníferas-.

El clima de la zona es mediterráneo, con todo su carácter irregular en precipitaciones y suavidad en temperaturas. La estación pluviométrica más cercana es la de Almogía, a una altitud de 425 m. y con un valor medio de volumen anual de precipitaciones de 511,1 mm para 48 años de registros.

No obstante, en la zona de estudio el desarrollo de la vegetación nos invita pensar que el volumen anual de precipitaciones puede ser sensiblemente superior al de aquella estación. Este volumen podría estar cercano al valor medio anual de otra estación cercana y de igual altitud que el área de estudio, Villanueva de la Concepción, con 610 mm.

El uso principal del suelo en el entorno, es el agrícola siendo los olivos y almendros los principales cultivos. Sin embargo, aparecen ciertas extensiones de matorral y bosque abierto mediterráneo en rodales, de alcornoques y encinas.

Las dos laderas estudiadas son un claro ejemplo de la evolución del ecosistema mediterráneo en los últimos 50 años: estuvieron cultivadas hasta la década de los sesenta del siglo XX cuando fueron abandonadas; desde entonces, fueron colonizadas por vegetación arbustiva y arbórea hasta conformar el bosque abierto mediterráneo actual, constituido por alcornoques, jaras, matagallos, lavandas,... Hay que apuntar por último que la actividad ganadera es activa, de carácter caprino y se deja sentir en el patrón de la vegetación y en las características edáficas (fundamentalmente en la ladera sur).

Desde el punto de vista de la vegetación, la zona de estudio se localiza dentro de la Provincia Mediterránea en la Bética, en el Sector Malacitano Axarquense, Distrito Malacitano. El estadio climácico de la vegetación correspondería a un bosque de encinar termófilo con alcornoques de la asociación *Smilaci mauritanicae - Querceto rotundifoliae quercetoso suberis* (Nieto Caldera, Pérez Latorre y Cabezudo, 1990) (Serie termomediterránea, Bética, Mariánico - Monchiquense y Rifeña, seco - subhúmeda e indiferente edáfica de la encina, subserie silicícola, seco superior - subhúmeda inferior con alcornoque). Son encinares climatófilos termomediterráneos que sobre sustratos silíceos (Paleozóicos y Triásicos) y zonas de ombroclima de piso seco superior, como es nuestro caso, desarrollan una faciación con alcornoques.

Una vez introducido el entorno en el que se insertan ambas laderas, vamos a describir los principales rasgos biológicos, topográficos, edáficos e hidrológicos de las mismas.

## 2.1. Las características biológicas

La superficie que ocupan ambas parcelas, es de 360 m<sup>2</sup> en la ladera Sur y de 375 m<sup>2</sup>, en la Norte. De esta superficie, el 46,3% y 42,1% respectivamente, está siendo colonizada por vegetación, en el marco de una dinámica invasiva puesto que se trata de campos anandonados, encontrándose el resto del suelo desnudo o con un ligero tapiz vegetal, que lo protege.

Como ya hemos señalado con anterioridad, la vegetación potencial viene dada por un encinar acompañado de alcornoque correspondiente a la serie *Smilaci mauritanicae* – *Querceto rotundifoliae quercetosae suberis*, aunque en nuestra zona de estudio predomina el alcornoque sobre la encina, al menos en su estado maduro, motivado, posiblemente, por la acción antrópica o por las condiciones ecológicas específicas del lugar que han favorecido el predominio de una especie con respecto a la otra. Estas formaciones se localizan en aquellas zonas de transición entre el ombrotipo seco y el subhúmedo. La primera etapa de sustitución y orla de estos encinares viene dada por por los lentiscales de *Bupleuro gibraltari* – *Pistacietum lentisci adenocarpetosum telonensis* (Pérez Latorre, Nieto Caldera y Cabezudo, 1993), sustituido en taludes umbrosos, laderas de barrancos y suelos conservados por formaciones arbustivas de *Bupleurum gibraltari* – *Ononidetum speciosae* (Rivas Goday y Rivas-Martínez, 1968). El matorral de sustitución lo conforma un jaral de *Lavandulo* – *Genistetum equisetiformis* (Rivas Goday y Rivas-Martínez, 1968). Sobre leptosoles encontramos un pastizal terofítico de *Tuberarion guttatae* y en los cauces, normalmente de aguas estacionarias adelfares de *Rubio* – *nerietum oleandri*.

Desde el punto de vista de la cobertura y la estructura de la vegetación actual, las dos laderas de estudio difieren sensiblemente. La ladera Sur presenta un matorral bajo de bastante densidad en las partes alta y baja de la ladera, es decir, en las zonas más cercanas al interfluvio y al talweg respectivamente. Predominan claramente especies arbustivas como el *Cistus monspeliensis*, *Cistus albidus*, *Helychrisum stoechas*, *Phlomis purpurea* o *Lavandula stoechas*. En la parte superior de la ladera el gran protagonista es el *Cistus monspeliensis*, apareciendo también *Cistus crispus* y *Chamaerops humilis*, mientras que en la parte baja encontramos *Retama sphaerocarpa*, *Genista umbellata*, que es la que presenta mayor extensión, y mayor abundancia de pastizal anual. No existen especies arbóreas, llegando el matorral a una altura máxima de un metro. Este jaral se va ahuecando hacia la parte media de la ladera de forma gradual hasta convertirse en un retamar claro dentro de una matriz de pastizal. En esta zona central se presentan de forma aislada la *Genista umbellata*, el *Helychrisum stoechas*, la *Lavandula stoechas*, el *Ulex parviflorus* y el *Chamaerops humilis*, cubriendo el pastizal anual más del 75% de la superficie total. Todas las especies apenas alcanzan los 50 cm. de altura, excepto la retama que puede llegar a casi los 3 m.

En la ladera Norte, en cambio, sí que se aprecian pies arbóreos de envergadura de *Quercus suber* principalmente, acompañado de *Quercus rotundifolia*. El regenerado de ambas especies es también importante. Como especies arbustivas predominantes encontramos *Cistus albidus*, *Helychrisum stoechas* y *Thapsia villosa* (casi inexistente en la ladera sur), y ya en menor grado de extensión *Ulex parviflorus* y *Lavandula stoechas*. En la parte baja de esta ladera predomina un matorral bajo que no sobrepasa el metro de altura con abundante pastizal anual, mientras que en las partes media y alta esta matriz de matorral se ve interrumpida por numerosos alcornoques y algunas encinas de más de cinco metros.

En ambas laderas, la actividad ganadera se manifiesta a través del patrón o disposición de la vegetación a lo largo de las mismas, observándose una mayor cantidad y dispersión en los individuos que la conforman, que en aquellas zonas que no se encuentran sometidas al pastoreo. Así, las distancias entre individuos se sitúan entorno a 40 cm., y dicha disposición se mantiene a lo largo de las laderas, aunque difiera el tipo de vegetación, y en ningún caso supera los 70 cm.

**TABLAS 1 Y 2**  
**DISTRIBUCIÓN DEL TIPO Y TAMAÑO DE VEGETACIÓN ACTUAL**  
**EN LAS LADERAS NORTE Y SUR**

Ladera Sur

TIPO DE VEGETACIÓN								TOTAL	AREA
	MP	P	PM	M	MG	G	MMG	INDIVIDUOS	TOTAL
Matorral	20	144	102	63	25	10	1	365	118,8
Veg. Anual	16	28	11	6	3	3	0	67	15,4
Veg. alta densidad	0	0	0	0	0	3	0	3	15,31
Veg. Muerta	1	31	19	4	2	4	0	61	17,93
<b>TOTAL</b>	<b>37</b>	<b>203</b>	<b>132</b>	<b>73</b>	<b>30</b>	<b>20</b>	<b>1</b>	<b>496</b>	<b>167,4</b>

Ladera Norte

TIPO DE VEGETACIÓN								TOTAL	AREA
	MP	P	PM	M	MG	G	MMG	INDIVIDUOS	TOTAL
Matorral	5	73	58	32	26	8	0	202	78,62
Veg. Anual	23	99	48	17	11	7	0	205	52,46
Veg. alta densidad	0	0	0	0	0	4	0	4	12,12
Veg. arbórea	0	0	0	0	0	3	0	3	13,13
Veg. muerta	0	6	3	2	0	0	0	11	2,411
<b>TOTAL</b>	<b>28</b>	<b>178</b>	<b>109</b>	<b>51</b>	<b>37</b>	<b>22</b>	<b>0</b>	<b>425</b>	<b>158,8</b>

MP (Muy pequeño=menos de 0.04m<sup>2</sup>), P (Pequeño=0.041-0.16m<sup>2</sup>), PM (Pequeño-Mediano=0.161-0.36m<sup>2</sup>), M (Mediano=0.361-0.64), MG (Mediano-Grande=0.641-1), G (Grande= 1.1-10), MMG (Muy grande= Mas de 10.1)

Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, las diferencias generadas por la exposición quedan plasmadas en sus características y tipos (tablas 1 y 2). La mayor humedad ambiental de la ladera Norte, supone la aparición de una mayor biomasa de vegetación anual que cubre prácticamente toda la ladera, mientras que en la ladera Sur, ésta no solo escasea más, sino que se concreta a las áreas medias de la misma. Por el contrario, el matorral de escaso porte constituido, como ya hemos apuntado, por jara blanca, jaguarzo, matagallo, cantueso, etc. , y en menor medida retama y palmito, coloniza de una forma mas homogénea la ladera Sur, aunque no está ausente en la Norte. Por último, la mayor diferencia interladeras es perceptible en la mayor abundancia en la ladera Sur de parches de vegetación muerta, -aunque vinculada radicalmente al suelo-, circunstancia que en la ladera Norte es inapreciable.

El 70% de la superficie vegetada de la ladera Sur está ocupada por matorral disperso, mientras en la Norte, solo ocupa el 49,3%, cifras bien correlacionadas en relación al número de individuos. Por otra parte, la vegetación anual, que apenas si en la ladera Sur supone un 9% del total, en la Norte es del 32,9%. Esta circunstancia podría deberse al momento en el que se adquieren las fotografías, mes de Octubre en el que se supone que en solana la vegetación habría adquirido ya la característica de combustible, lo que debería vincularse a la presencia de vegetación muerta en la misma, en mucha mayor medida que en la Norte.

Sin embargo, esto no sucede, o al menos en igual medida, puesto que la vegetación agostada, si bien es el 10,7% en ladera Sur, frente al 1,5% en ladera Norte, dista mucho de las cifras que obtuvimos en la Norte.

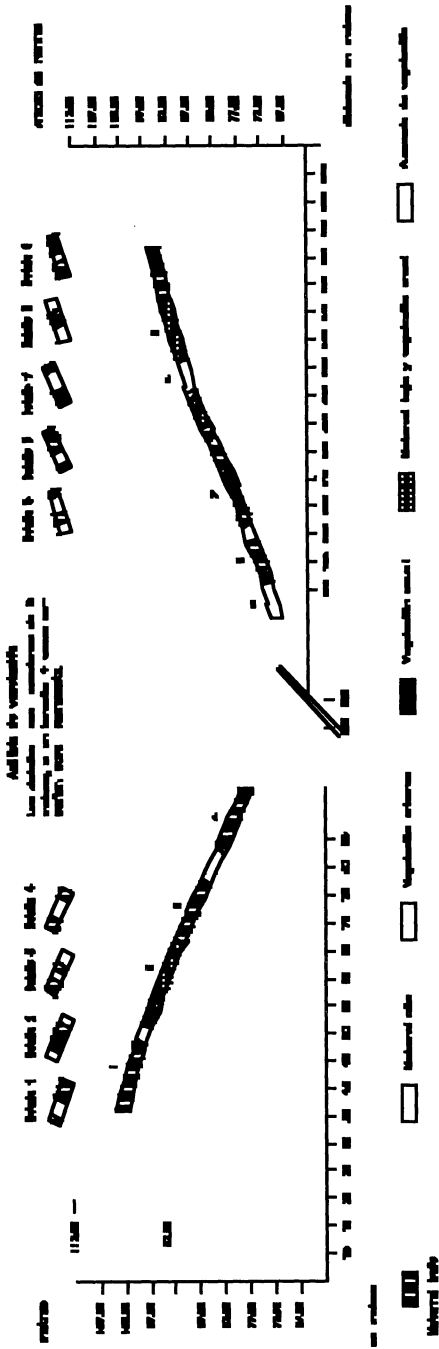
La vegetación de alta densidad está representada en ambas laderas de forma similar, 9,1% en ladera Sur y 7,6% en ladera Norte; sin embargo, en la ladera Norte el 8,3% de la vegetación es arbórea, -alcornoques-, frente a su inexistencia en la Sur.

Así pues, y dentro del marco de la existencia de unos patrones de vegetación similares, consideramos importante incidir en el papel de la vegetación de temporada o terófito, como indicador de unas condiciones ecogeomorfológicas diferentes entre ambas laderas, que se deberán traducir en unas propiedades físicas e hidrodinámicas diferenciales de los suelos. Aunque no es menos cierto, que la abundancia de este tipo de vegetación, generara un mayor consumo hídrico, frente a la ladera en donde es mas escasa.

## **2.2. Las características topográficas**

Ambas laderas tienen características similares en cuanto a longitud y pendiente, como se aprecia en la sección transversal (figura 4), y la disposición longitudinal de la vegetación se atiene al patrón referido, aunque con diferen-

FIGURA 4  
PERFILES TOPOGRÁFICOS DE LAS LADERAS Y PATRÓN DE LA VEGETACIÓN



Fuente: Elaboración propia.

tes patches dominantes. Es decir, dispersión espacial y discontinuidad longitudinal.

La discontinuidad longitudinal no solo tiene una repercusión estrictamente paisajística, sino también, en la microtopografía de las laderas, con las consecuentes repercusiones en las propiedades físicas de las formaciones superficiales.

La topografía de las laderas se realizó mediante el uso de una Totalstation tipo Topcom, obteniendo como resultado unos perfiles convexos, -Sur- o mixtos, -Norte-, bastante representativos del modelado típico de las formaciones filíticas. Sin embargo, dichos perfiles, pese a exhaustivos, esconden un efecto directo del pastoreo que dadas las posibles consecuencias hidrodinámicas que genera, merece ser resaltado. Y es que el continuo tránsito de ganado a través de las laderas supone, cuando el suelo se encuentra en condiciones de humedad adecuada, un efecto compactador sobre el mismo, lo cual se traduce en una microtopografía constituida a base de pequeñas terrazas de dimensiones entre 40-60 cm de ancho., a todo lo largo de las mismas.

Tal circunstancia ha podido ser constatada mediante el uso de un perfilador de 3 m. de longitud, con testeadores cada 20 cm., y el consecuente levantamiento de perfiles topográficos. Obtuvimos así, ocho perfiles en la ladera Sur y siete en la Norte.

El resultado es razón directa del uso ganadero y de la dinámica de la misma en las laderas estudiadas. Dado que durante el periodo de precipitaciones, la ladera mas intensamente utilizada es la Sur, la capacidad de compactación de los suelos en los caminos transversales es superior, con lo que la aparición de microterrazas es mucho mas evidente que en la Norte. Todos los perfiles realizados en la ladera Sur, obedecen a dicho patrón, en donde las microdepresiones se suceden con pequeños taludes, en los que se sitúa la vegetación.

En la ladera Norte, la actividad ganadera es más estival, según información facilitada por los pastores de la zona, momento en el que el suelo se encuentra más seco y es menos susceptible a la compactación, de ahí que la profusión de las microterrazas sea menos intensa.

### **2.3. Las características edáficas**

Ambas laderas se caracterizan por una similitud edáfica, la cual se plasma a su vez en toda una serie de propiedades edáficas analizadas, según hemos descrito en la metodología, a lo largo de los 10 puntos de muestreo escogidos en cada una de las laderas (tabla 3). Los distintos suelos encontrados vienen a coincidir según la clasificación de la FAO, con regosoles y leptosoles, teniendo estos como denominador común: perfiles poco profundos, con una profundi-

dad que oscila entre los 22 cm. de media de la ladera Sur y los 36 de la Norte, un escaso desarrollo de los mismos, derivado de la acción erosiva a la que han sido sometidos, lo cual se va a ver reflejado en la existencia de un alto contenido en gravas, que en ningún caso es inferior al 50 %, sin que apenas se produzcan afloramientos de roca madre.

**TABLA 3**  
**PROPIEDADES EDÁFICAS DE LAS LADERAS NORTE Y SUR**

Ladera Norte	Parc.2	Parc.4	Parc.6	Parc.9	Parc.12	Parc.14	Parc.16	Parc.18	Parc.21	Parc.24	Media
Profundidad suelo	36	33	32	39	25	21	47	48	48	31	36
pH	6.8	6.8	6.8	6.9	6.6	6.5	6.6	6.5	6.3	6.6	6.4
Porosidad (%)	43	40	36	36	49	40	51	45	53	48,5	44,15
Densidad Aparente (gr/cm <sup>3</sup> )	1,2	1,34	1,44	1,4	1,45	2,47	1,16	1,33	1,19	1,28	1,51
Gravas (%)	60,9	63,3	61,8	60,1	58,6	63,5	64,9	65,6	65,9	62,8	62,74
Arcillas (%)	17,3	16,7	17,9	13	15,6	17,3	16,4	19,1	12,3	13,1	15,87
Limos (%)	27,7	31	30,4	29,1	31,7	30,2	31	32,1	35,3	32,8	31,13
Arenas (%)	55	52,3	51,7	57,9	52,7	52,5	52,6	48,8	52,4	54,1	53
Carbonatos (%)	2,2	1,9	1,7	1,3	1,44	1,2	1,53	1,09	1,43	1,17	1,5
Materia Orgánica (%)	6,4	3,73	2,8	4,85	2,58	3,51	3,76	3,9	4,38	3,01	3,89
Salinidad (mS/cm)	2,46	1,35	0,99	1,42	1,36	0,97	1,22	1,16	1,44	1,26	1,36
C.I.C (mEq/100gr)	0,17	0,47	2,41	5,73	7,49	6,75	6,25	8,73	7,28	6,3	9,51
E.E. R inicial: Seco	5,7	5,8	8,2	7,9	8,6	12,3	10,1	10,8	10,3	11	9,07
E.E. R final: Seco	48,8	23,3	24,2	23,6	26,8	32,3	33,1	26,4	31,2	29,8	29,98
E.E. R inicial: Húmedo	34,3	20,5	15,8	12,3	20,6	22,2	19,7	20,7	24,6	15,5	20,31
E.E. R final: Húmedo	70,2	62,6	68,2	40,3	64,4	63,8	62,8	62,7	73,6	59,1	62,77
Ladera Sur	Parc.2	Parc.4	Parc.6	Parc.9	Parc.12	Parc.14	Parc.16	Parc.18	Parc.21	Parc.24	Media
Profundidad suelo	34	22	11	33	18	17	16	23	19	29	22,20
pH	6.7	6.4	6.2	6.2	5.9	6.0	5.7	6.2	6.3	6.5	6.2
Porosidad (%)	50	56	46	44	41,5	47	37	35	30	34	42,05
Densidad Aparente (gr/cm <sup>3</sup> )	2,26	1,1	1,41	1,45	1,52	1,39	1,5	1,52	1,61	1,31	1,51
Gravas (%)	52,3	51,02	57,6	58,3	50	52,6	59,3	50	51,27	50,6	53,30
Arcillas (%)	24,8	4,09	7,9	16	11,9	9,9	15,7	19,5	20,9	29,1	15,98
Limos (%)	33,03	53,17	47,7	40	39,7	29,6	38,7	38,9	54,3	36,3	41,14
Arenas (%)	42,2	42,73	44,4	44	48,3	60,6	45,5	41,6	24,9	34,7	42,89
Materia Orgánica (%)	30,5	4,15	1,96	2,03	2,15	2	3,02	5,29	4,38	7,56	6,30
Salinidad (mS/cm)	1,35	2,08	1,48	1,32	0,79	1,11	1,14	1,95	1,11	3,26	1,56

**TABLA 3**  
**PROPIEDADES EDÁFICAS DE LAS LADERAS NORTE Y SUR**

Ladera Norte	Parc.2	Parc.4	Parc.6	Parc.9	Parc.12	Parc.14	Parc.16	Parc.18	Parc.21	Parc.24	Media
C.I.C (mEq/100 gr)	18,51	15,63	15,22	3,98	9,7	13,45	8,8	6,78	2,78	0,23	9,51
E.E. R inicial: Seco	3,2	8,7	5,3	6	3,6	5,7	12,5	5,1	5,1	6,4	6,16
E.E. R final: Seco	16,6	38,7	34,1	23,4	16,1	24,9	36,3	30,7	30,7	48,3	29,98
E.E. R inicial: Humedo	4,2	39,7	7,1	13,2	9,8	7,4	34,5	7,8	9,2	19,1	20,31
E.E. R final: Humedo	18	79,3	28,2	40,4	40,4	24,3	75,8	32,1	40,7	64,8	44,40

CIC: Capacidad Total de Intercambio Catiónico.. E.E.: Estabilidad estructural. R: Rotura.

Fuente:Elaboración propia.

Las diferencias entre laderas no son muy significativas, pudiendo resaltar alguna propiedad como el contenido en materia orgánica, por su repercusión directa o indirecta en otras variables edáficas. De esta forma en la ladera Norte, donde el contenido en materia orgánica es mayor, se aprecia una reducción de la densidad aparente con respecto a la ladera Sur, lo que unido a que cuentan con densidades reales muy similares, dado que poseen el mismo material parental, hace que esta tenga una mayor porosidad.

Por otra parte, la materia orgánica favorece la estructura agregada, lo que se aprecia en los resultados obtenidos en el test de estabilidad estructural, que fueron mejores en la ladera Norte, sobre todo en los obtenidos para agregados a pF 1. Ambas laderas van a tener una textura con tendencia arenosa, si bien este carácter va a estar mucho mas marcado en la Norte, mientras que la Sur manifiesta un mayor contenido en limos, permaneciendo los niveles de arcilla muy similares en las dos. En cuanto al contenido de gravas, como ya apuntábamos anteriormente es bastante elevado, dándose los mayores porcentajes en la ladera Norte.

Por otro lado, los niveles de acidez del suelo son muy similares aunque algo mayores en la ladera Sur, donde son neutros, mientras que en la Norte son ligeramente ácidos. Respecto a las tasas de intercambio total catiónico, van a ser bajas en ambos casos, aunque algo inferiores en la ladera Norte. Habría que hacer también mención a variables como la salinidad o el contenido en carbonatos, las cuales resultan insignificantes en ambas laderas.

Por último, hemos de significar la importancia que tiene la actividad ganadera en determinadas propiedades físicas de las formaciones superficiales, como puede ser la compactación de suelos, claramente visible en la ladera Sur y que son en parte responsables de los matices existentes entre ambas laderas.

Tampoco son perceptibles grandes diferencias intraladera. Solo en la capacidad total de intercambio catiónico se observa una dinámica diferente a lo largo de la ladera, siendo esta última distinta en la ladera Sur que en la Norte, ya que en la



primera se produce un aumento conforme descendemos, mientras que en la Norte tiene lugar el efecto contrario, aunque de forma más moderada. Esto puede conferir un diferente control en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, distinta estabilidad de agregados, y un comportamiento diferencial del suelo como depurador natural, siendo por tanto incidente en la curva característica de humedad. En el resto de variables, no se observan diferencias intraladera que merezcan ser destacadas.

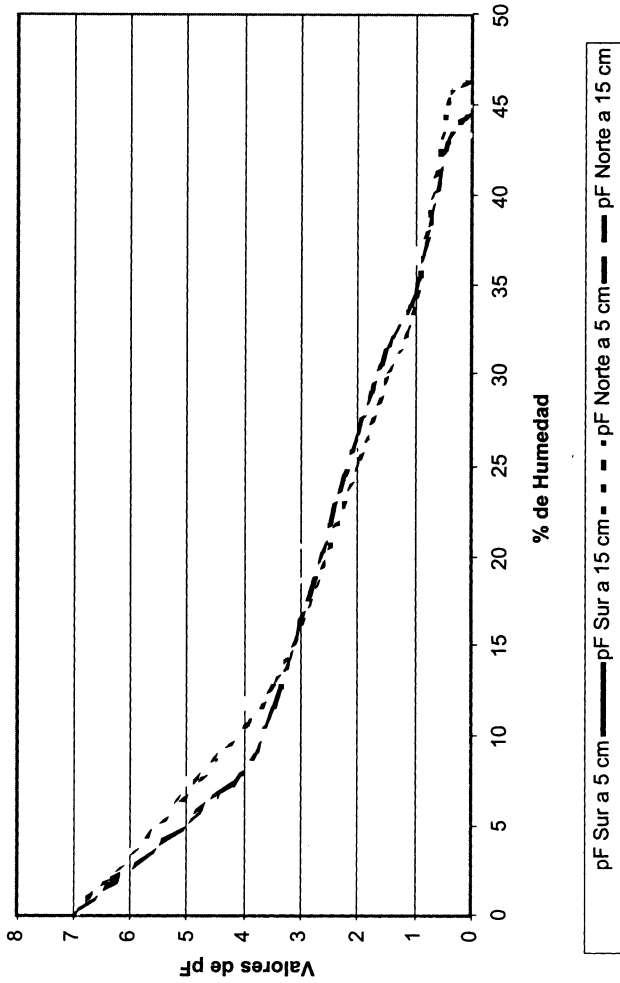
El análisis del pF, está realizado sobre las curvas medias obtenidas en ambas laderas (gráfico 1), observando en ellas grandes similitudes morfológicas, pero con algunas diferencias que marcaran la diferente capacidad de almacenamiento de agua.

En ellas, apreciamos una dualidad de comportamiento en cuanto a su capacidad de retención hídrica, situándose el punto de inflexión en torno a pF 2, es decir, el punto a partir del cual comienza el flujo de agua gravitacional lenta, donde el agua pasa a estar disponible por las plantas.

Para valores de pF inferiores a 2, la ladera Norte posee claramente una mayor capacidad de retención que en la ladera Sur. El punto de saturación se sitúa en el 46,3 % de humedad volumétrica por un 44,9 % en la ladera Sur a nivel superficial, lo cual tiene su correspondencia a 15 cm. de profundidad, disponiéndose el punto de saturación en un 44,5 % en la ladera Norte por un 42,8 % en la Sur. Estas diferencias vienen explicadas por la mayor porosidad de la ladera Norte, así como por su mayor contenido en materia orgánica, que además de dotar al suelo de una mejor estructura, va a generar una mayor capacidad de succión para los valores mas bajos de pF.

Por otro lado, a partir del valor de pF 2 y para valores superiores a este, vemos como tiene lugar una inversión en la capacidad de retención hídrica entre los suelos de las dos laderas, pasando a ser superior de aquí en adelante en la ladera Sur, incrementándose las diferencias entre la capacidad de retención de ambos suelos, conforme el valor de pF es superior, coincidiendo la mayor diferencia, con el valor de pF 4,2, -punto de marchitez-, para comenzar a reducirse estas diferencias para valores de pF superiores a este, puntos en los que el agua deja de ser aprovechable por las plantas. Este comportamiento estaría más acentuado en las curvas características de las muestras recogidas a 15 cm., en relación a las superficiales.

**GRÁFICO 1**  
**CURVAS DE PF MEDIAS DE LAS DOS LADERAS**  
 Valores medios de pF



Fuente:Elaboración propia.

La razón de este cambio la encontraríamos en la textura mas limo-arcillosa de la ladera Sur, así como en la mayor cantidad de materia orgánica de la ladera Norte, que pasa a tener un efecto negativo en la capacidad de retención hídrica, conforme aumenta el valor del pF. Todo esto, va a tener a su vez repercusión en la cantidad de agua útil para las plantas, que es aquella que encontramos entre los valores de pF 1,8-2,5 (según el tipo de suelo) y el punto de marchitez (pF 4,2), y que va a ser superior en la ladera Sur que en la Norte, observando como veíamos antes una mayor diferencia en profundidad, que a nivel superficial.

## 2.4. Las características hidrológicas

Al objeto de determinar la incidencia de las propiedades físicas de las formaciones superficiales, en su comportamiento hidrológico, llevamos a cabo el estudio de distintas propiedades hídricas, como son: infiltración, sortividad y conductividad hidráulica. Éste se llevo a cabo en los mismos puntos en los que realizamos los análisis edáficos. Los resultados son presentados las tablas 4 y 5.

**TABLAS 4 Y 5**  
**PROPIEDADES HÍDRICAS DE LAS LADERAS SUR Y NORTE**

PROPIEDAD HÍDRICA	Propiedades hidrológicas de la ladera Sur										Media	Desv. st
	2	4	6	8	10	12	14	16	19	22		
Infiltración media (cm/s)	0,30	0,49	0,52	0,49	0,40	1,11	1,33	1,18	3,04	0,96	0,98	0,81
Inf acumulada (cm)	15,6	15,6	15,4	14,8	13,6	14,1	18,1	20,9	14	36,7	17,88	6,97
Sortividad (-5) (cm)	7,50	5,40	5,70	5,70	6,60	3,00	3,30	3,80	5,30	2,70	4,90	1,62
Ksat (-5) (cm/min)	0,90	1,20	1,20	1,60	0,40	0,60	3,00	2,50	0,40	1,10	1,29	0,87
Sortividad (-8)	16,90	5,20	11,40	16,00	4,40	4,30	4,40	11,90	10,00	3,60	8,81	5,10
Ksat (-8) (cm/min)	0,20	0,40	0,40	0,20	0,10	0,20	0,40	0,30	0,20	0,50	0,29	0,13

Propiedades hidrológicas de la ladera Norte

PROPIEDAD HÍDRICA	PARCELA										Media	Desv. st
	2	4	6	8	10	12	14	16	19	22		
Infiltración media (cm/s)	0,65	0,46	1,11	0,97	1,42	0,85	1,72	0,49	0,42	0,37	0,85	0,46
Inf acumulada (cm)	17,1	24,3	11,9	15,1	14,5	12	10,6	12,8	8	7,1	13,34	4,92
Sortividad (-5) (cm)	35	21,6	21,9	56,06	34,6	56	53,23	78,6	45	37,3	43,93	17,57
Ksat (-5) (cm/min)	1,3	2,8	1,3	1,5	0,2	0,2	0,7	0,3	0,5	0,7	0,95	0,81
Sortividad (-8)	61,8	63,3	66,8	48,8	53,5	31,4	65,4	54,9	64,3	47,9	55,81	11,01
Ksat (-8) (cm/min)	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,1	0,3	0,2	0,21	0,09

Fuente: Elaboración propia.

Las pruebas de infiltración fueron realizadas tanto en las microterrazas – ladera Sur–, como a lo largo de la ladera, –ladera Norte–, mediante el uso de un infiltrómetro de cilindro de 10 cm. de diámetro y 30 cm. de altura. Las de sortividad y conductividad hidráulica, mediante el uso de un permeámetro de disco de 20 cm. de diámetro.

Las tasas medias de infiltración son similares en ambas laderas, así como la infiltración acumulada, si bien, son ligeramente superiores en la ladera Sur. Sin embargo, las áreas infiltradoras son las altas y medias en la ladera Sur, y las bajas en la Norte, lo que puede deberse a la existencia de patrones de escorrentía diferentes entre ambas laderas. (Lavee et al, 1998); esto podremos corroborarlo con el análisis hidrológico e hidrodinámico de los siguientes apartados y así constatar si estamos en presencia de un modelo de escorrentía por saturación en ladera Norte, y de un modelo hortoniano discontinuo o mixto en ladera Sur. No obstante, somos conscientes de las limitaciones del método del cilindro, dado que sometemos al suelo a una excesiva carga hidráulica con la posibilidad de generación de vías preferenciales, y ocultación de datos.

Más significativos resultan los datos relacionados con la sortividad, calculada a tensiones de –5 y –8 bar, en los que podemos observar como aparece una manifiesta diferencia entre laderas. Para ambas tensiones, la sortividad en la ladera Norte es muy superior a la existente en la Sur, con cifras medias de 4,90 y 8,81 cm. en esta, frente a 43,93 y 55,81 cm. en la Norte, lo que está directamente relacionado con una mejor estructura del suelo. Esto explicaría, la existencia de una mayor capacidad de absorción hídrica, en condiciones de no saturación por parte de aquellos suelos mejor estructurados y más profundos, como los existentes en la ladera Norte.

La conductividad hidráulica en condiciones de saturación de un suelo permite poner de manifiesto su capacidad de transmisión de agua hacia horizontes subsuperficiales, y aunque los resultados obtenidos deben interpretarse con cautela, sí nos ofrecen cifras que nos permiten asegurar que no estamos en

presencia de suelos con una excesiva capacidad de transmisión hídrica en condiciones de saturación, siendo incluso inferiores en la ladera Norte, debido a la mayor capacidad de retención de los suelos mas arcillosos en la Sur.

### **3. COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO DEL ÁREA**

Bajo estas características ecogeomorfológicas hemos tratado de verificar el comportamiento hidrológico e hidrodinámico desde el punto de vista empírico en ambas laderas. Es decir, desde el conocimiento experimental del área, aplicaremos teorías hidrológicas e hidrodinámicas y realizaremos experimentación de campo al objeto de ajustar los posibles comportamientos de la escorrentía en la misma, como factor previo a la generación de caudales.

Para ello, recurrimos a la aplicación de métodos ya reseñados, basados en un similar supuesto en ambas laderas. Una precipitación uniforme de 45 lts/m<sup>2</sup>, durante una hora de duración. Se trataría de aproximarnos a su respuesta hidrológica e hidrodinámica.

#### **3.1. La aproximación hidrológica**

Para determinar la respuesta hidrológica recurrimos al método del numero de curva del SCSA, a fin de establecer la precipitación efectiva, el exceso de precipitación, y la escorrentía consecuente. Previamente, habíamos de establecer el tiempo de concentración del agua en la ladera, atendiendo a criterios hidrológicos, para lo que utilizamos la ecuación de California, comúnmente usada dentro del ámbito de la hidrología superficial. Según el resultado obtenido de dicha ecuación, el  $T_c = 107''$ , una vez absorbida la abstracción inicial, ( $I_a$ ) y la continuada, ( $F_a$ ), ya mencionadas en las hipótesis iniciales, y por tanto, una vez iniciada la escorrentía superficial, ( $Q_e$ ), el tiempo de concentración de dicha escorrentía en el cauce estaría cercano a 2 minutos.

Dado el patrón de vegetación de ambas laderas, todos los cálculos fueron efectuados de forma individualizada, atendiendo a los componentes del complejo suelo-vegetación del mismo. Esta circunstancia es muy digna de considerar dado el supuesto diferente comportamiento hidrológico, por la existencia de una serie de discontinuidades dentro del complejo a lo largo de las laderas. De ahí la necesidad de comparar la aproximaciones hidrológicas e hidrodinámicas.

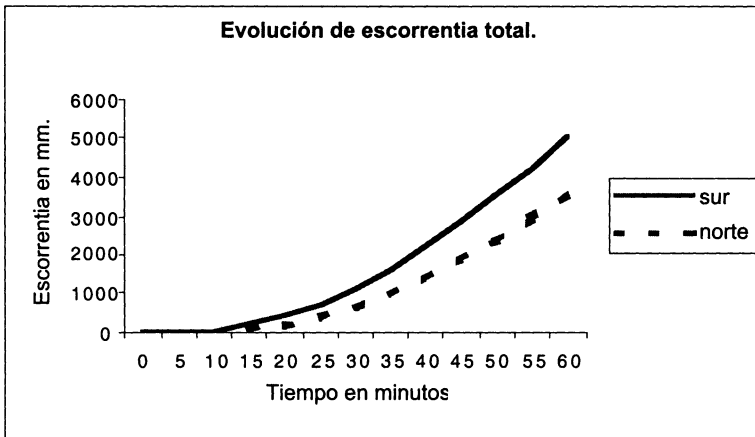
Atendiendo a los resultados presentados en las tablas 1 y 2, es fácil deducir la existencia de tales discontinuidades, puesto que el tamaño de los individuos en ambas laderas apenas si superan los 0,36 m<sup>2</sup>. Esto supondría la existencia de muchas áreas generadoras de escorrentía, seguidas inmediatamente de otras tantas, infiltradoras, lo que se traduciría a nivel de ladera en:

1. retraso de los tiempos de concentración del agua.
2. reducción de las tasas de escorrentía.

Para la comprobación de tales hipótesis realizamos los cálculos hidrológicos atendiendo a métodos clásicos ya descritos.

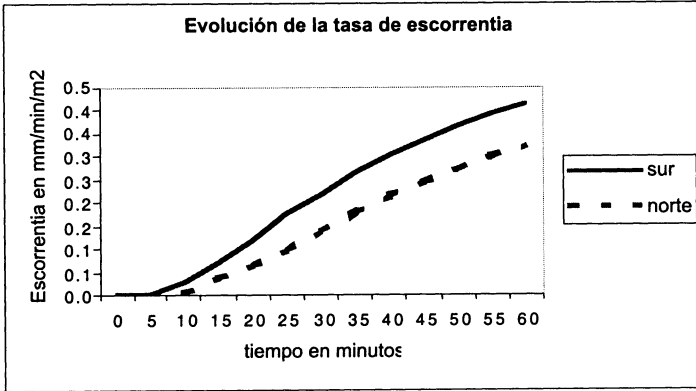
La ladera sur emite más escorrentía superficial que la norte y mas rápido (gráfico 2), lo que puede obedecer a circunstancias relacionadas tanto con las características de la vegetación, -menor porte-, como con la presencia de unas propiedades físicas de las formaciones superficiales mas hidrófobas, con una mayor presencia de las arcillas, menor estabilidad estructural, materia orgánica,...Por tanto, las tasas de escorrentía son superiores en una respecto de la otra (gráfico 3).

**GRÁFICO 2**  
**EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA ESCORRENTÍA TOTAL**



Fuente: Elaboración propia.

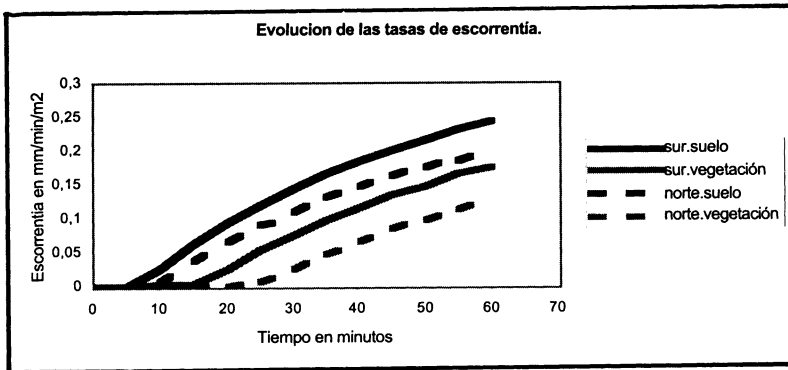
**GRÁFICO 3**  
**EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA TASA DE ESCORRENTÍA**



Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, tal comportamiento, no es homogéneo a lo largo de las mismas, de ahí la importancia concedida al patrón de vegetación. Así, las tasas de escorrentía siempre son mas altas y se producen en más corto tiempo en suelos desnudos que en los vegetados, con independencia de la orientación de las laderas. Además, para ambas laderas la incorporación del agua en forma de escorrentía a la misma, se produce en el doble de tiempo en suelos vegetados en relación a los desnudos (gráfico 4).

**GRÁFICO 4**  
**EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LAS TASAS DE ESCORRENTÍA SEGÚN LA OCUPACIÓN EL USO**



Fuente: Elaboración propia

En cualquier caso, la emisión de escorrentía, cesaría justo con el final de la precipitación, con la lógica aplicación del tiempo de concentración ya descrito anteriormente, (tabla 7). Lo cual, si hidrológicamente es aceptado, desde el punto de vista hidrodinámico, a escala de ladera, y en condiciones mediterráneas, parece no responder a la realidad.

### 3.2. Aproximación hidrológica modificada

Mediante el uso de un difusor de goteo, con agua impregnada de anilina, y previa saturación del suelo, llevamos a cabo experimentos a fin de determinar la velocidad de flujo en laderas en función de la pendiente.

Los resultados medios obtenidos los mostramos en la tabla 6, siendo la velocidad media en las laderas objeto de estudio de 74 cms/min.

**TABLA 6**  
**RELACIÓN PENDIENTE-VELOCIDAD DE ESCORRENTÍA**

PEND.(°)	VEL en cm/min.
10 A 15	53,27217816
16 A 20	68,84259243
21 A 25	69,98040014
26 A 30	78,20828363
31 A 35	91,42261679
36 A 40	201,0470841

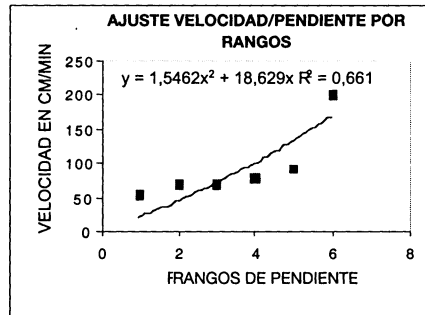
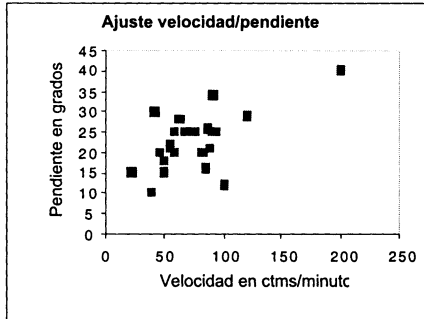
Fuente: Elaboración propia.

Además, los ajustes entre pendiente y velocidad quedan bastante bien plasmados en los Graficos 5 y 6, así como la ecuación de ajuste entre ambas variables.

Bajo este planteamiento, ajustamos los valores obtenidos aplicando variables hidrológicas a la velocidad de transferencia de flujos en ambas laderas (gráficos 5 y 6), utilizando los datos obtenidos experimentalmente, y posteriormente calculamos el hidrograma de escorrentía para la precipitación establecida, considerando la infiltración existente –con modificación en el NC-, tras finalizar la precipitación, continuando el  $Q_e$  de desfase.



**GRÁFICOS 5 Y 6**  
**AJUSTE ESTADÍSTICO ENTRE LA VELOCIDAD Y LA PENDIENTE;**  
**Y AJUSTE ESTADÍSTICO ENTRE LA VELOCIDAD Y LA**  
**PENDIENTE SEGÚN RANGOS**



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados los presentamos en el gráfico n° 7. En él observamos como la base del hidrograma se amplía considerablemente, unido a que los valores absolutos son inferiores en ambas laderas, aunque la ladera sur se comporta como mas emisora de escorrentía que la norte.

Los hidrogramas son diferentes en su forma. Durante la precipitación, ambos adoptan una tendencia similar, llegando a alcanzar valores muy parecidos, entre 3 y 4 mm/min. Es justo al finalizar la precipitación, con el suelo saturado, cuando podemos observar dos tendencias derivadas de las características de los complejos suelo-vegetación.

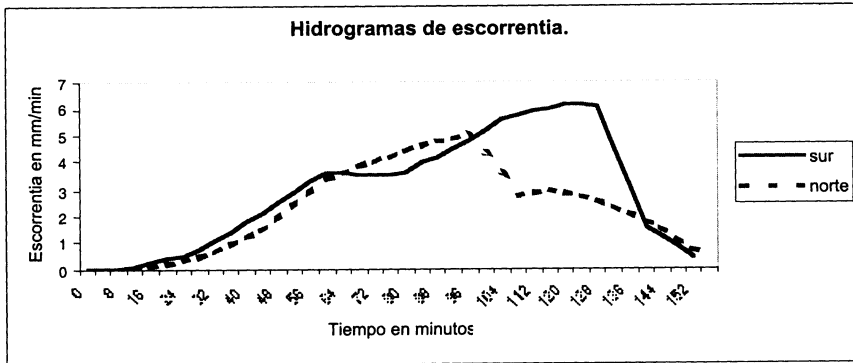
La respuesta rápida de la ladera sur, es un descenso de la escorrentía inmediata, la generada por la precipitación, para a partir de unos minutos, -unos 23 min.- empezar a incrementarse lentamente hasta alcanzar el máximo en el min. 132. A partir de ahí, desciende bruscamente. Obedecería por tanto a un comportamiento o patrón hidrológico modificado, en donde sería la incidencia de los factores bióticos/abióticos los que organizarían los flujos de agua en la ladera. Eso podríamos observarlo aún mas evidente al considerar las tasas de escorrentía. Se reduce la escorrentía directa, se incrementa la de desfase, y el pico de descenso es mas acusado, justo cuando el suelo, más hidrófobo, pierde su capacidad de transferencia debido a su menor conductividad hidráulica.

**TABLA 7**  
**RESULTADOS DEL AJUSTE HIDROLÓGICO ENTRE LADERAS**  
**(QE: ESCORRENTÍA)**

LADERA SUR		AJUSTES HIDROLÓGICOS ENTRE LADERAS													
ÁREA	TIPO	tp en mín.	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
375	total	Qe(mm)	0	0,74	51,93	178,91	404,66	729,01	1142,25	1636,29	2201,62	2830,18	3512,79	4250,42	5028,59
207	suelo	Qe(mm)	0	0,74	48,80	164,55	338,99	564,67	835,33	1145,72	1491,34	1868,37	2273,52	2703,93	3157,12
167	Vegetación	Qe(mm)	0	0,00	3,13	14,37	65,67	164,34	306,92	490,57	710,28	961,81	1239,27	1546,50	1871,46
		dif. Qe.	0,74	0,74	51,19	126,99	225,75	324,35	413,25	494,04	565,33	628,56	682,61	737,64	778,16
LADERA NORTE		Qe/mm <sup>2</sup>	0	0,00	0,03	0,07	0,12	0,17	0,22	0,26	0,30	0,34	0,36	0,39	0,42
375	Total	Qe(mm)	0	0,00	14,20	85,80	210,82	395,53	658,27	993,80	1394,34	1855,29	2369,92	2932,30	3537,37
174	Suelo	Qe(mm)	0	0,00	14,20	85,39	209,23	378,88	588,66	833,77	1110,15	1414,35	1743,40	2094,73	2466,14
201	vegetación	Qe(mm)	0	0,00	0,00	0,41	1,59	16,65	69,61	160,03	284,19	440,94	626,52	837,57	1071,23
		dif. Qe.	0,00	0,00	14,20	71,60	125,02	184,71	262,74	335,53	400,54	460,95	514,63	562,38	605,06
		Qe/mm <sup>2</sup>	0	0,00	0,01	0,04	0,07	0,10	0,14	0,18	0,21	0,25	0,27	0,30	0,32

Fuente: Elaboración propia.

### GRÁFICO 7 HIDROGRÁMAS DE ESCORRENTÍA DE LAS LADERAS SUR Y NORTE

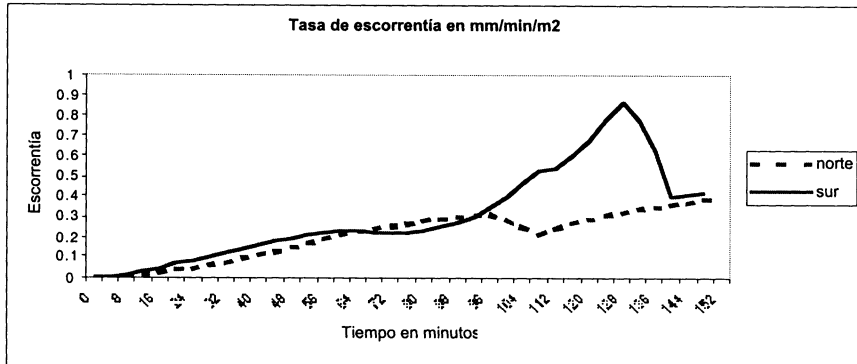


Fuente: Elaboración propia.

La ladera norte, con predominio de los factores bióticos, posee un comportamiento más uniforme, atendiendo a lo que podemos denominar un patrón hidrológico. La duración de la precipitación conlleva un incremento de la escorrentía, lo cual es evidente. Pero, al cesar aquélla, sigue produciéndose escorrentía directa, sin que apenas se acuse el efecto de tal reducción sobre el área contribuyente, circunstancia que se producirá en el minuto 96. La capacidad retenedora de la vegetación, es mas importante que en la ladera sur. Y de igual forma que sucede en la ladera sur, transcurridos unos minutos, comienza levemente lo que podemos denominar escorrentía de desfase, para irse reduciendo progresivamente hasta aproximarse al valor 0.

Pero si el hidrograma de escorrentía refleja este comportamiento, la mayor conductividad hidráulica del suelo, ya comentada, se plasma en la tasa de escorrentía (gráfico 8), puesto que continúa incrementándose a pesar del descenso de la escorrentía bruta. Si la infiltración es mayor, la transferencia desde las áreas altas a las bajas también lo es, manteniéndose, aun en valores bajos ese leve incremento de la escorrentía de desfase.

### GRÁFICO 8 EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LAS TASAS DE ESCORRENTÍAS DE LAS ALDERAS NORTE Y SUR



Fuente: Elaboración propia.

De este modo, adaptando factores hidrodinámicos en los cálculos hidrológicos, podríamos obtener respuestas al desigual comportamiento superficial y probablemente subsuperficial del agua en diferentes sistemas ecogeomorfológicos.

Sin embargo, surgen una serie de preguntas y dudas a las que pretendemos dar respuesta a continuación.

#### 4. DISCUSIÓN Y VALIDEZ DEL MÉTODO

La presente investigación no es más que una aproximación al comportamiento teórico del agua en las vertientes de litologías no acuíferas, aplicando los conceptos hidrológicos al uso, así como su ajuste al comportamiento observado mediante la recurrencia a métodos experimentales. De su aplicación, resultaba una respuesta hidrológica inmediata y en cierta medida desorbitada en las vertientes, sobretodo en lo referente a la activación y desactivación de los mecanismos generadores de la escorrentía. Ésta cesaba justo con el final de la precipitación.

La experimentación demuestra que tales aproximaciones hidrológicas eran incorrectas, sobretodo en lo relativo a la velocidad del agua ladera abajo y, por tanto, a la incorporación de la misma en forma de caudal en el talweg. Además, al variar el tiempo de permanencia del agua en la ladera, también cambiarían a lo largo del tiempo las capacidades hidrológicas de las unidades consideradas,

es decir, los NC. De ahí que decidiésemos ajustar la curva de generación de escorrentía –hidrológica–, a los tiempos de concentración obtenidos de forma experimental. Los resultados han sido presentados anteriormente y, en esencia, muestran una ampliación sustancial de la base del hidrograma..., así como una reducción de las tasas brutas de escorrentía, lo que se debería traducir en una mayor presencia del agua en las laderas y, por consiguiente, en una hipotética mayor capacidad de infiltración en los suelos.

A este ajuste lo hemos denominado “hidrológico modificado”, aun siendo conscientes de que solo estábamos “organizando” la incorporación de la escorrentía al cauce, considerando los consecuentes cambios en la capacidad de infiltración de los suelos y por tanto, la escorrentía superficial.

Dada la magnitud de la precipitación considerada, 45 ls/m<sup>2</sup>/hora, y con los ajustes considerados, la escorrentía a tasas moderadas continuaba hasta casi 100 minutos tras la finalización de la precipitación. Es decir, supuestamente la escorrentía superficial se mantenía por gravedad finalizado el evento, como si el área que atravesase dicho flujo superficial se comportase como un cristal. Lo que resultaba más que dudoso, dadas las propiedades físicas e hidrológicas de las formaciones superficiales.

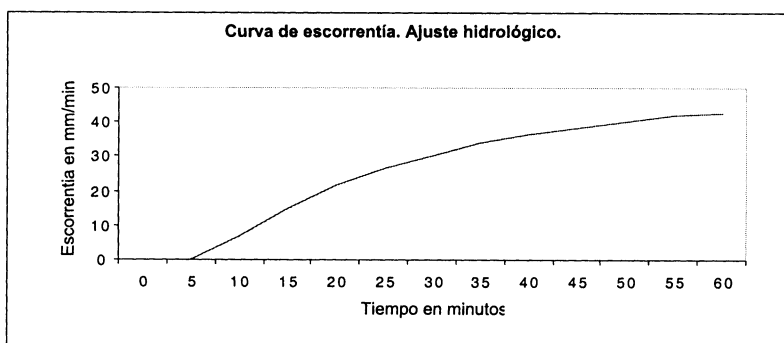
En este punto hemos de recurrir a los modelos de generación de escorrentía en condiciones mediterráneas y litologías no acuíferas y, concretamente, al modelo de escorrentía hortoniano discontinuo o modelo mixto. Según estos, la presencia y sucesión a lo largo de la ladera de áreas infiltradoras y generadoras, suponían una modificación sustancial a los modelos clásicos de flujo hortoniano. Esta circunstancia había sido recogida en la asignación del NC del SCS, a cada individuo componente del mosaico biótico/abiótico de las laderas, así como las modificaciones subsecuentes derivadas de la progresiva humectación del suelo durante la precipitación. Sin embargo, la existencia de vías preferenciales de flujo, plasmadas en microdepresiones, así como la morfología del propio patrón de vegetación, hacían difícil la cuantificación de la dinámica de la escorrentía en ambas laderas. Dicho de otra forma, el margen de aleatoriedad podía ser muy alto. Además, la existencia de pequeñas costras superficiales, generadas por la deposición de los finos de arcilla y su posterior desecación, en dichas microdepresiones hacían sospechar la permanencia del agua en ellas durante cierto tiempo y, por tanto, variaciones respecto al modelo.

Al objeto de poder cuantificar dicha dinámica, determinamos en el centro de la parcela experimental en la ladera sur una franja de 50 cms de ancho, por la longitud de la misma, a la que le aplicamos todas las variables hidrológicas e hidrodinámicas determinadas. Se trataba de poseer una sucesión de los distintos microambientes y usos del suelo a fin de determinar su comportamiento hidrológico e hidrodinámico para un evento pluviométrico como el definido.

#### 4.1. Respuesta hidrológica

Está basada en la simple aplicación de las variables hidrológicas al uso, obteniendo una respuesta muy similar a las planteadas con anterioridad. Es decir, inmediatez y elevadas tasas de escorrentía, atendiendo a lo que podemos denominar un modelo hortoniano, (Grafico 9). Esto puede deducirse de la comparación de la diferencia entre la abstracción inicial y la continuada, en relación a la precipitación. El incremento progresivo del exceso de precipitación y por tanto de la escorrentía durante el evento y su inmediato cese justo con el fin de la precipitación, avalan la presencia de dicho flujo hortoniano, (Grafico 10).

**GRÁFICO 9**  
**EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA ESCORRENTÍA SEGÚN EL AJUSTE HIDROLÓGICO.**



Fuente: Elaboración propia.

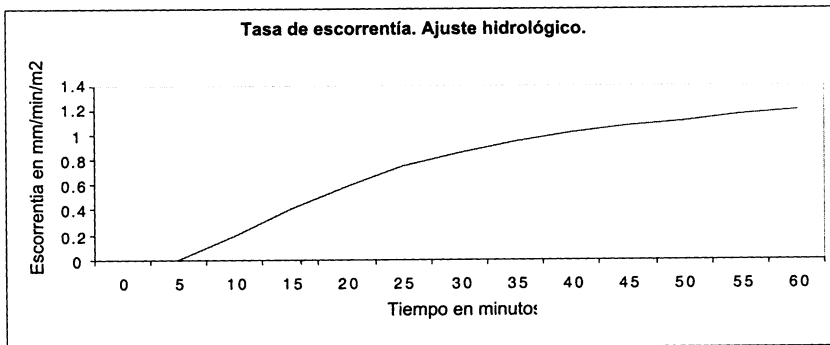
**TABLA 8**  
**RESULTADOS DE LA APLICACIÓN HIDROLÓGICA A LA FRANJA DE 50 CMS CENTRAL, DE LA LADERA SUR**

tp. en min.	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Ia medio.	0	1,945	2,833	3,502	3,615	3,728	3,729	3,729	3,729	3,729	3,729	3,729	3,729
dif. Pmm/Ia	0	0,152	1,363	2,791	4,776	6,761	8,858	10,955	13,053	15,151	17,249	19,347	21,444
Fa medio	0	0,148	1,085	1,945	3,113	4,082	5,010	5,816	6,525	7,154	7,717	8,225	8,685
Qe. Total	0	0,605	36,409	110,868	217,885	350,994	504,090	673,222	855,167	1047,561	1248,624	1456,979	1671,540
Dif. Qe.		0,605	35,804	74,460	107,016	133,110	153,095	169,133	181,944	192,395	201,063	208,355	214,561
Qe. min		0,121	7,161	14,892	21,403	26,622	30,619	33,827	36,389	38,479	40,213	41,671	42,912
Qe/min/m2		0,003	0,199	0,414	0,595	0,739	0,851	0,940	1,011	1,069	1,117	1,158	1,192

Fuente: Elaboración propia.

Estaríamos en presencia de un flujo de escorrentía continuo e incremental, a medida que se produce saturación en las formaciones superficiales, de tal punto que de continuar el evento, en un momento determinado del mismo, prácticamente toda la precipitación en contacto con el suelo, se conformaría como escorrentía, (Tabla 8).

### GRÁFICO 10 EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA TASA DE ESCORRENTÍA SEGÚN EL AJUSTE HIDROLÓGICO



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2. Respuesta hidrológica modificada o mixta

Dadas las bajas tasas de flujo en la ladera, entorno a 1 mm/min/m<sup>2</sup>, la velocidad de transferencia del mismo no puede ser comparable a las comúnmente asimiladas por la hidrología de transferencia de flujo en laderas. Para su ajuste, recurrimos al método experimental para verificar dicho comportamiento del fluido. Establecidas las velocidades de flujo, ajustadas según la pendiente, y los cambios progresivos en el NC, procedimos a la elaboración del hidrograma resultante para una precipitación de similares características.

**TABLA 9**  
**COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS APROXIMACIONES HIDROLÓGICAS E HIDRODINÁMICAS**

COMPARACION ENTRE LAS DIFERENTES APROXIMACIONES										
Tp. en min.	Qe. mm/min			Qe. Intervalo.(mm/5 min)			Qe. Total.evento			Pmm/effect.
	MIXTO	HIDROL.	HIDRODIN	MIXTO	HIDROL.	HIDRODIN	MIXTO	HIDROL.	HIDRODIN	
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	0,004	0,121	0,004	0,018	0,605	0,018	0,018	0,605	0,018	274,811
10	0,211	7,161	0,211	1,057	35,804	1,057	1,074	36,409	1,074	549,621
15	1,014	14,892	1,014	5,071	74,460	5,071	6,145	110,868	6,145	824,432
20	2,009	21,403	2,009	10,047	107,016	10,047	16,193	217,885	16,193	1099,242
25	3,313	26,622	3,313	16,565	133,110	16,565	32,757	350,994	32,757	1374,053
30	5,245	30,619	5,245	26,226	153,095	26,226	58,983	504,090	58,983	1648,863
35	7,424	33,827	7,424	37,120	169,133	37,120	96,103	673,222	96,103	1923,674
40	9,615	36,389	9,615	48,073	181,944	48,073	144,176	855,167	144,176	2198,484
45	11,744	38,479	11,744	58,719	192,395	58,719	202,895	1047,561	202,895	2473,295
50	13,781	40,213	13,781	68,903	201,063	68,903	271,798	1248,624	271,798	2748,105
55	15,775	41,671	15,775	78,876	208,355	78,876	350,673	1456,979	350,673	3022,916
60	17,802	42,912	17,802	89,008	214,561	89,008	439,682	1671,540	439,682	3297,726
65	18,380	0,000	14,248	91,901	0,000	71,240	531,583	0,000	510,921	
70	16,098	0,000	2,717	80,490	0,000	5,299	612,073	0,000	516,221	
75	15,950	0,000	0,000	79,751	0,000	0,000	691,824	0,000	0,000	
80	14,785	0,000	0,000	73,924	0,000	0,000	765,748	0,000	0,000	
85	12,888	0,000	0,000	64,442	0,000	0,000	830,190	0,000	0,000	
90	13,530	0,000	0,000	67,651	0,000	0,000	897,841	0,000	0,000	
95	15,589	0,000	0,000	77,943	0,000	0,000	975,784	0,000	0,000	
100	17,245	0,000	0,000	86,224	0,000	0,000	1062,008	0,000	0,000	
105	18,867	0,000	0,000	94,333	0,000	0,000	1156,341	0,000	0,000	
110	19,584	0,000	0,000	97,919	0,000	0,000	1254,260	0,000	0,000	
115	19,837	0,000	0,000	99,183	0,000	0,000	1353,443	0,000	0,000	
120	20,304	0,000	0,000	101,519	0,000	0,000	1454,962	0,000	0,000	
125	12,758	0,000	0,000	63,792	0,000	0,000	1518,754	0,000	0,000	
130	11,821	0,000	0,000	59,107	0,000	0,000	1577,861	0,000	0,000	
135	11,195	0,000	0,000	55,975	0,000	0,000	1633,836	0,000	0,000	
140	8,370	0,000	0,000	41,850	0,000	0,000	1675,687	0,000	0,000	
145	5,110	0,000	0,000	25,549	0,000	0,000	1701,236	0,000	0,000	
150	1,444	0,000	0,000	7,220	0,000	0,000	1708,456	0,000	0,000	

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos (tabla 9) obedecen a la misma casuística que la presentada anteriormente. Es decir, incremento del tiempo de retardo hidrológico, muy por encima de la duración del evento pluviográfico, y reducción de las tasas de escorrentía, así como de la escorrentía punta.



Pero aceptar dicha estimación supone también considerar que finalizada la precipitación, y durante 90 minutos, continuaba un flujo superficial, con lo que la ladera se comportaría como un cristal, lo que parece poco razonable en condiciones mediterráneas. Además, las cifras presentadas adolecen de una importante consideración hidrodinámica; la relativa a la sucesión de áreas generadoras/infiltradoras a lo largo de la ladera.

### **4.3. Respuesta hidrodinámica**

A lo largo de la ladera, la sucesión de bandas de vegetación con zonas de suelo desnudo, constituyen un obstáculo a la transferencia de escorrentía desde las partes altas a las bajas, o al menos atendiendo al modelo de escorrentía hortoniano.

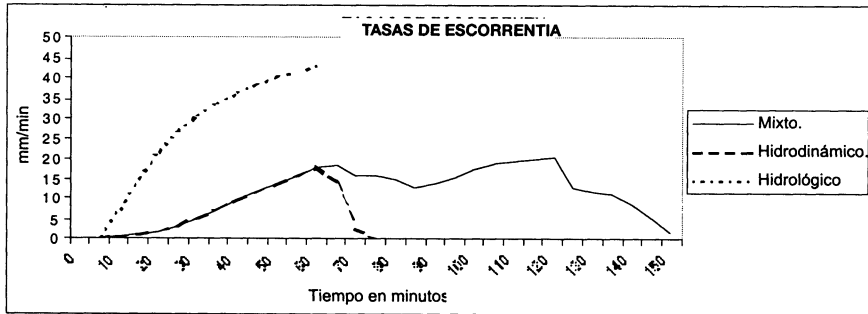
Durante la precipitación, la generación de escorrentía viene controlada por la sucesión de diferentes abstracciones iniciales ( $I_a$ ), y continuadas ( $F_a$ ), unido a los cambios en las mismas como resultado del humedecimiento progresivo en el perfil edáfico. Así, la curva de generación de escorrentía coincide tanto en el modelo hidrodinámico como en el hidrológico modificado o mixto (gráfico 11).

Sin embargo, es a partir del cese de la precipitación, cuando se genera una distinta tendencia, manifestada en una reducción o desaparición del “input” generado por la misma, por unos cambios en la  $I_a$  y  $F_a$ , por tanto con un incremento de la infiltración en el suelo y por una modificación de la emisión de escorrentía y tiempo de duración de la misma ( $Q_e$ ).

Al objeto de poder incorporar estos planteamientos hidrodinámicos a la teoría hidrológica, y una vez cesada la precipitación, implementamos los cálculos de la  $I_a$  y  $F_a$ , modificando sus valores en función de los niveles de saturación del suelo, a las áreas por las que transcurriría la escorrentía ladera abajo, (Tabla 9). Los resultados muestran como dicho flujo superficial se infiltraría progresivamente, hasta desaparecer, unos 10 min. tras la finalización del evento. (Gráfico 11).

En cualquier caso, y para un mismo evento aparecían 3 tipos de hidrogramas dependiendo del peso asignado a las variables hidrológicas o hidrodinámicas. La diferencia en cuanto a las tasas brutas de emisión, morfología de los hidrogramas y tiempo de desfase, finalizada la precipitación, hasta la consecución del  $Q_e = 0$ , nos hicieron recurrir a métodos experimentales, como factor de comprobación de tales hipótesis teóricas. Para ello, llevamos a cabo varias simulaciones de lluvia en la ladera.

**GRÁFICO 11**  
**EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LAS TASAS DE ESCORRENTÍA**  
**SEGÚN DIFERENTES APROXIMACIONES**



Fuente: Elaboración propia.

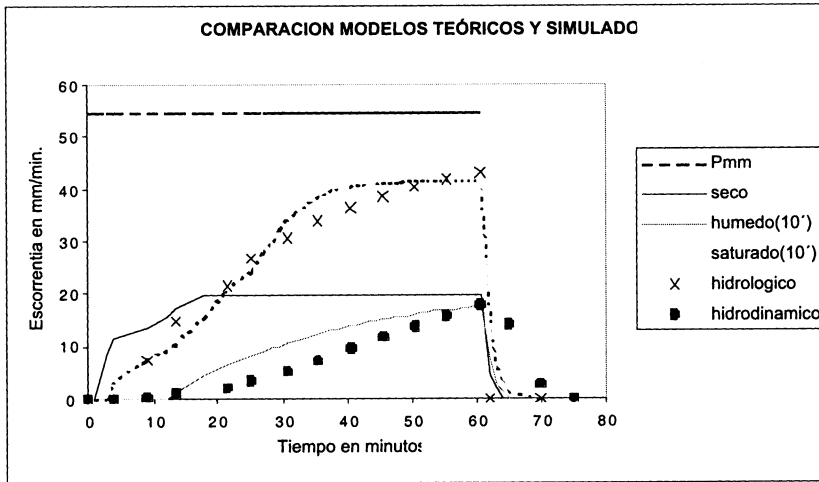
#### 4.4. El ajuste experimental

En un área representativa de las características ecogeográficas de la ladera, llevamos a cabo simulaciones de precipitación mediante el uso del simulador diseñado por Calvo Cases (Calvo Cases et al, 1997). La parcela sobre la que se llevaron a cabo las simulaciones era circular, y tenía una dimensión de 55 cms de diámetro. Es decir, se comportaba como una pequeña cuenca, con la ventaja de conocer exactamente el volumen de lluvia incidente, y el inconveniente de ocultar información relativa a la interconexión de áreas a lo largo de la ladera.

Todas las simulaciones tuvieron la misma duración (60 min), se efectuaron con la misma intensidad, (55 mm/hora en boquilla hardí, y entre 43-48 en superficie), y atendieron al siguiente planteamiento: En primer lugar, sobre suelo seco, (4% de humedad vol.); finalizada esta, y transcurridos 10 min, sobre suelo humedo, (14% de humedad vol.); y por último, y tras otro 10 min., sobre suelo cercano a la saturación, (27% de humedad vol.). Así mismo, fueron recogidas muestras de sólidos, aunque no son objeto de la presente investigación. Podríamos asimilar la situación intermedia, con lo que el SCS del USDA denomina, "condición II, o suelo en condiciones normales de humedad". ( )

Los resultados de las mismas son presentados a continuación (Gráfico 12 y tabla 10).

## GRÁFICO 12 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS TEÓRICOS Y SIMULADOS



Fuente: Elaboración propia.

a.- Respuesta hidrológica inmediata en condiciones extremas. Sea por exceso o déficit de humedad, la escorrentía se inicia mucho antes que cuando las condiciones tienden a ser normales. Solo que en un caso es debido a la formación de microcostras tras el efecto splash, y el otro por saturación.

b.- Diferente morfología del hidrograma, resultado de una desigual respuesta de la formación superficial.

- Suelo seco: Si la respuesta hidrológica es inmediata tras el inicio de la precipitación, transcurrido 1/3 de la misma, se alcanza una tasa de escorrentía que permanece constante hasta el final del evento simulado, sin apenas superar los 20 mm/min. Es decir, alcanzado un cierto nivel de humedad, y descompactado el suelo, se produce una tasa de transferencia hacia horizontes subsuperficiales.
- Suelo saturado: Iniciada la escorrentía, la estabilización de la misma no se produce hasta transcurridos más de 40 min., y en unos valores muy por encima de la generada en las condiciones de humedad anteriores, llegando incluso a duplicarse.
- Suelo húmedo: La escorrentía se inicia transcurrido 1/4 de la duración de la precipitación, y en unas tasas muy por debajo de las anteriores, incrementándose lentamente y de forma progresiva, pero alcanzando valores por debajo de los 20 mm/min. A diferencia de las otras condi-

ciones hidrológicas del suelo, no se llega a estabilizar la curva de escorrentía en ningún momento.

c.- Diferente respuesta tras el final del evento. Una vez finalizado la precipitación simulada, la reducción de la tasa de escorrentía se produce de forma inmediata en los minutos siguientes, pero no al mismo tiempo; el  $Q_e=0$ , aparece en la simulación efectuada en suelo seco a los 4 min. finalizada la precipitación, en suelo húmedo a los 5 min. y en suelo saturado a los 10 min. Es decir, la “pequeña cuenca”  $-0,3025 \text{ m}^2-$ , que constituye la parcela de simulación sigue emitiendo escorrentía dependiendo de la condición hidrológica del suelo, entre 4 a 10 min. finalizada la misma. (tabla 10).

**TABLA 10**  
**RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES Y COMPARACIÓN CON**  
**LOS MODELOS TEÓRICOS**

RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES, Y COMPARACION CON MODELOS TEORICOS						
Tp	Pmm	seco	húmedo(10')	saturado(10')	hidrológico	hidrodinámico
0	55	0	0	0	0	0
1	55	0	0	0		
3	55	8,741432	0	0		
4	55	11,4123	0	3,09821	0,12099981	0,00356741
9	55	13,7653	0	7,5409	7,16070501	0,21130157
12,11611	55	15,6434	0	9,12984		
13,5	55	17,14172	1,066071	10,1635932	14,8919632	1,01422963
18	55	19,58132	4,173007	15,5310027		
21,5	55	19,58313	6,251157	20,3297142	21,4032505	2,00946223
25	55	19,58313	8,073096	24,2436804	26,6219266	3,3129211
27	55	19,58313	9,011494	27,4360277		
28,5	55	19,58313	9,670413	30,0397901		
29,5	55	19,58313	10,0895	32,163471		
30,75	55	19,58313	10,59167	33,9887509	30,6190659	5,24513778
32,32	55	19,58313	11,18988	35,384373		
33,57	55	19,58313	11,64154	36,4607389		
34,5	55	19,58313	11,96408	37,4005856		
35,5	55	19,58313	12,29853	38,167163	33,8265597	7,42391237
36,5	55	19,58313	12,62065	38,7924119		
37,5	55	19,58313	12,93088	39,3023636		
38,5	55	19,58313	13,22967	39,7183048		
39,5	55	19,58313	13,51743	40,07278		
40,5	55	19,58313	13,79458	40,3466809	36,3888907	9,6146391

**TABLA 10**  
**RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES Y COMPARACIÓN CON**  
**LOS MODELOS TEÓRICOS**

RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES, Y COMPARACION CON MODELOS TEORICOS						
Tp	Pmm	seco	húmedo(10 <sup>7</sup> )	saturado(10 <sup>7</sup> )	hidrológico	hidrodinámico
41,5	55	19,58313	14,0615	40,559957		
42,5	55	19,58313	14,31857	40,7440313		
43,5	55	19,58313	14,56616	40,8941808		
44,5	55	19,58313	14,80461	41,0166382		
45,5	55	19,58313	15,03427	41,116515	38,4789047	11,7438214
46,5	55	19,58313	15,25545	41,2052416		
47,5	55	19,58313	15,46847	41,2703524		
48,5	55	19,58313	15,67363	41,3186193		
49,5	55	19,58313	15,87122	41,4347361		
50,5	55	19,58313	16,06152	41,4919533	40,2126255	13,7805324
51,5	55	19,58313	16,2448	41,5020682		
52,5	55	19,58313	16,42132	41,512442		
53,5	55	19,58313	16,59133	41,5204433		
54,5	55	19,58313	16,75506	41,5271291		
55,5	55	19,58313	16,91275	41,5328875	41,6709671	15,7751477
56,5	55	19,58313	17,06462	41,5375675		
57,5	55	19,58313	17,21089	41,5414065		
58,5	55	19,58313	17,35177	41,5446415		
59,5	55	19,58313	17,48744	41,5473158		
60,65	55	19,58313	17,48744	41,5473158	42,9121529	17,8016877
62		4,453	7,764	14,692	0	
63		1,765	2,953	5,41		
64		0	1,159	2,744		
65		0	0	0,912		14,2479201
70				0	0	2,71677206
75						0

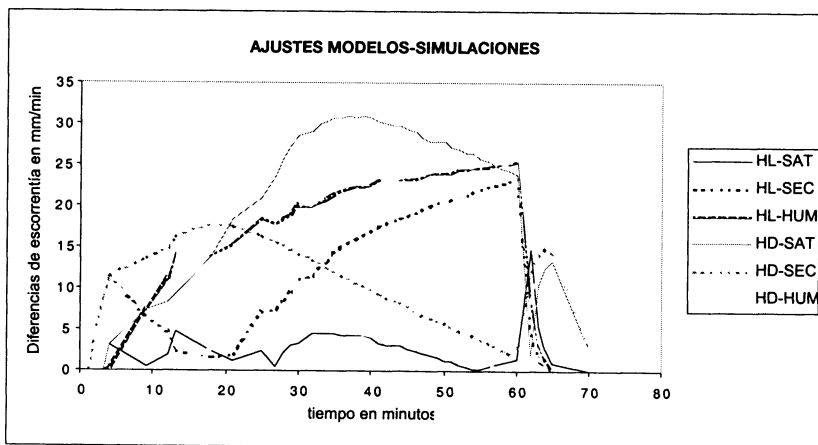
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5. Comparación de resultados

De los resultados obtenidos de la experimentación, podemos obtener las siguientes conclusiones:

a.- En lo que respecta a valores absolutos, y considerando la morfología de los hidrogramas resultantes, el ajuste entre el teórico comportamiento hidrológico y el hidrograma de escorrentía en condiciones de saturación es muy elevado. Asimismo, aparece un buen ajuste entre las condiciones teóricas hidrodinámicas y las de suelo húmedo. A tal fin, en el gráfico 13, mostramos las diferencias absolutas por unidad de tiempo entre las curvas de escorrentía obtenidas mediante el método hidrológico (HL), o hidrodinámico (HD), con los resultados obtenidos en las simulaciones en suelo seco (SEC), saturado (SAT), o húmedo (HUM). Obtenemos así 6 posibles ajustes. Lógicamente, mientras más se aproxime a cero, mayor será el ajuste entre ambas variables. Así, podemos observar gráficamente como los mejores ajustes se producen entre el modelo hidrológico y la escorrentía resultante con el suelo saturado, de una parte, y entre el modelo hidrodinámico, y la resultante con suelo húmedo. En los restantes casos, los desajustes son importantes en algún momento del hidrograma, como sucede entre el modelo hidrológico-suelo seco y húmedo, y el hidrodinámico-suelo saturado.

**GRÁFICO 13**  
**AJUSTES DE LOS MODELOS CON LAS SIMULACIONES DE LLUVIA**



Fuente: Elaboración propia.

b.- La curva de inicio de los procesos de escorrentía adquiere una morfología similar en suelo seco y saturado, y un mejor ajuste con el modelo teórico hidrológico, mientras que en condiciones de humedad, la referencia es más adecuada al modelo hidrodinámico.

c.- La curva de escorrentía de desfase una vez finalizada la precipitación o la simulación, se adecúa más al modelo hidrológico que al hidrodinámico en cualquiera de las situaciones edáficas, tal y como se muestra en el gráfico, aunque los desfases con el modelo hidrodinámico no son excesivamente altos.

Tales ajustes han sido verificados mediante análisis estadístico. Para ello, llevamos a cabo distintas correlaciones entre las series de variables consideradas, en su conjunto, así como concretando a los valores iniciales y finales del  $Q_e$ , sea teórico o simulado.

Los resultados (tabla 11) muestran a nivel general como los hidrogramas resultantes de las simulaciones poseen un mejor ajuste con el modelo hidrológico que con el hidrodinámico. Sólo cuando el suelo está bajo ciertas condiciones de humedad aparece un buen ajuste con el modelo hidrodinámico. Además, el más bajo se produce en condiciones de suelo seco. Podríamos pensar por tanto, que el patrón de escorrentía hidrodinámico sólo comienza a actuar bajo ciertas condiciones de humedad del suelo.

**TABLA 11**  
**RESULTADOS DE LOS AJUSTES ENTRE LOS MODELOS DE**  
**APROXIMACIÓN AL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO E**  
**HIDRODINÁMICO DE LAS LADERAS Y LAS SIMULACIONES DE**  
**LLUVIA**

	SECO	HUMEDO	SATURADO	HIDROLOG	HIDRODIN
SECO	—	<b>0,767</b>	<b>0,857</b>	<b>0,881</b>	<b>0,239</b>
HUMEDO	0,767	—	0,976	0,961	0,718
SATURADO	0,857	0,976	—	0,983	0,596
HIDROLOG	0,881	0,961	0,983	—	0,560
HIDRODIN	0,239	0,718	0,596	0,560	—

Fuente: Elaboración propia.

Pero nos parecía de especial interés el análisis de los ajustes entre los hidrogramas obtenidos mediante simulación con los realizados ajustados a los modelos de escorrentía considerados. Hemos establecido así 3 segmentos, plasmados en el inicio, centro, y final de la escorrentía, puesto que esas eran las diferencias mas evidentes planteadas entre ambos modelos.

Resulta de especial interés el comportamiento de la escorrentía desde el inicio de la precipitación hasta que alcanza una tasa constante. El objetivo es determinar si la escorrentía de inicio se produce atendiendo a patrones hidrológicos o hidrodinámicos. Las correlaciones efectuadas (tabla 12) durante los primeros 10 min. tras el inicio del evento —sea teórico o simulado— evi-

dencian unos significativos ajustes. Aunque en cualquier caso, existe un buen ajuste entre las curvas experimentales y las teóricas, solo en el caso de condiciones de saturación del suelo ese ajuste es casi total. Es decir, cuando el suelo está próximo a la saturación, ante un inicio de la precipitación, la respuesta por parte de la escorrentía es inmediata, lo que por otra parte, resulta lógico.

**TABLA 12**  
**RESULTADOS DE LOS AJUSTES ENTRE MODELOS EN EL**  
**INICIO DE LA ESCORRENTÍA**

	I_SEC	I_HUM	I_SAT	I_HIDROL	I_HIDROD
I_SEC	—	<b>0,650</b>	<b>0,851</b>	<b>0,848</b>	<b>0,748</b>
I_HUM	0,650	—	0,924	0,890	0,955
I_SAT	0,851	0,924	—	0,984	0,965
I_HIDROL	0,848	0,890	0,984	—	0,962
I_HIDROD	0,748	0,955	0,965	0,962	—

Fuente: Elaboración propia.

Si consideramos las condiciones de humedad edáfica en las que llevamos a cabo las simulaciones, podremos obtener las siguientes valoraciones:

- a. En condiciones de “suelo seco”, el inicio de la escorrentía se ajusta mejor al modelo hidrológico que al hidrodinámico, aunque no exista un mal ajuste con este último.
- b. El “suelo húmedo” presenta un inicio de la curva de escorrentía mas ajustado al modelo hidrodinámico.
- c. El “suelo saturado” presenta elevados ajustes en ambos modelos de escorrentía, aunque quizá dicho ajuste es prácticamente total en relación al hidrológico.

El análisis de los ajustes de las curvas de escorrentía de desfase en relación a los modelos planteados presenta resultados significativos. Para ello, intentamos correlacionar los resultados obtenidos durante las simulaciones desde los últimos 5 minutos de duración de la precipitación hasta el cese completo de la escorrentía, con los modelos estudiados. En este caso, obtuvimos unos muy buenos ajustes (tabla 13) entre cualquiera de las condiciones de humedad edáfica con el modelo hidrológico, mientras que en relación al hidrodinámico, estas tienen un ajuste de tipo medio, aunque en el caso del suelo húmedo es ligeramente superior (+0,615). Es decir, justo con el final de la precipitación se produce una reducción drástica de la escorrentía, que se mantiene solo durante unos minutos proporcionales al nivel de saturación del suelo.



**TABLA 13**  
**RESULTADOS DE LOS AJUSTES ENTRE MODELOS DE**  
**ESCORRENTÍA DURANTE LOS ÚLTIMOS CINCO MINUTOS DE**  
**ESCORRENTÍA**

	F_SEC	F_HUM	F_SAT	F_HIDROL	F_HIDROD
F_SEC	—	<b>0,991</b>	<b>0,998</b>	<b>0,993</b>	<b>0,553</b>
F_HUM	0,991	—	0,997	0,974	0,615
F_SAT	0,998	0,997	—	0,985	0,588
F_HIDROL	0,993	0,974	0,985	—	0,515
F_HIDROD	0,553	0,615	0,588	0,515	—

Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento de la escorrentía durante la precipitación, nos evidencia también un ajuste digno de ser valorado. En este caso, y dado que la tasa de escorrentía en suelo seco tiene valores constantes en el tramo medio del hidrograma, no hemos obtenido coeficientes de correlación, pero si merecen destacarse los ajustes para las restantes situaciones.

**TABLA 14**  
**RESULTADOS DE LOS AJUSTES ENTRE MODELOS DURANTE**  
**LA ESCORRENTÍA**

	SECO_C	HUMED_C	SATUR_C	HIDROL_C	HIDROD_C
SECO_C	,	,	,	,	,
HUMEDO_C	,	—	0,939	0,996	0,989
SATUR_C	,	0,939	—	0,942	0,881
HIDROL_C	,	0,996	0,942	—	0,985
HIDROD_C	,	0,989	0,881	0,985	—

Fuente: Elaboración propia.

Ambos modelos tienen unos ajustes muy elevados, sin embargo, el hidrológico ajusta a niveles muy altos tanto para la situación de suelo húmedo como saturado, mientras que el hidrodinámico ajusta mejor para la situación de suelo húmedo que para la de saturado.

## 5. CONCLUSIONES

1<sup>a</sup>.- Pueden llevarse a cabo estimaciones de la escorrentía resultante a escala de ladera, basándonos en métodos empíricos, como el utilizado del Número de Curva del SCS del USDA, para la determinación del hidrograma según el ajuste al modelo hidrológico o al hidrológico modificado.

2<sup>a</sup>.- En cualquier caso, las correlaciones obtenidas entre los hidrogramas estimados para los modelos hidrológicos o hidrodinámicos y los resultados de las simulaciones de precipitación obtenidos en el campo, resultaron ser positivas y cuando menos, con un ajuste aceptable.

3<sup>a</sup>.- La aplicación del método de Numero de curva hidrológico del SCS, tiene un ajuste casi perfecto, -tanto estadísticamente como por sus valores absolutos-, con los resultados obtenidos a través de simulación de precipitación en suelo saturado.

4<sup>a</sup>.- La estimación de la escorrentía mediante la aplicación del método del Numero de curva del SCS, con los reajustes hidrodinámicos, coincide con los resultados obtenidos a través de simulaciones en suelo húmedo.

5<sup>a</sup>.- La activación rápida del proceso de escorrentía como sucede en condiciones hidrológicas, coincide con los resultados obtenidos en las simulaciones en suelo seco o saturado, mientras que la escorrentía de respuesta lenta se asemeja a los resultados obtenidos en las simulaciones en suelo húmedo.

## BIBLIOGRAFÍA

- BERGKAMP, G. (1998): "A hierarchical view of the interactions of runoff and infiltration with vegetation and microtopography semiarid shrublands". *Catena*, 33, 201-220.
- BERGKAMP, G., CERDÁ, A., IMESON, A.C. (1998): "Magnitude-frequency analysis of water redistribution along a climate gradient in Spain". *Catena*, 37, 129-146.
- BOIX-FAYOS, C., CALVO-CASES, A., IMESON, A.C., SORIANO-SOTO, M.D., TIEMESSEN, I.R. (1998): "Spatial and short-term temporal variations in runoff, soil aggregation and other soil properties along a mediterranean climatological gradient". *Catena*, 33, 123-138.
- CERDÁ, A. IBÁÑEZ S, Y CALVO, A. (1997): "Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain". *Soil Technology*, 11, 163-170.
- CERDÁ, A. (1997): "Seasonal changes of the infiltration rates in a Mediterranean scrubland on limestone". *Journal of Hydrology*, 198, 209-225.
- De PEDRAZA GILSANZ, J. et al. (1996): *Geomorfología. Principios, métodos y aplicaciones*, Rueda. Madrid.
- HUANG, Ch. (1998): "Sediment regimes under different slope and Surface hydrologic conditions". *Soil Science society of America*, 62, 423-430.
- HUANG, C., GASCUEL-ODOUX, C., CROS-CAYOT, S. (2001): "Hillslope topographic and hydrologic effects on overland flow and erosion". *Catena*, 46, 177-188.
- IMESON, A.C. AND LAVEE, H. (1998) "Soil erosion and climate change: the transect approach and the influence of scale". *Geomorphology*, 23, 219-227.
- KOSMAS, C., DANALATOS, N., CAMMERAAT, L.H., CHABART, M., DIAMANTOPOULOS, J., FARAND, R., GUTIERREZ, L., JACOB, A., MARQUES, H., MARTINEZ-FERNANDEZ, J., MIZARA, A., MOUSTAKAS, N., NICOLAU, J.M., OLIVEROS, C., PINNA, G., PUDDU, R., PUIGDEFABREGAS, J., ROXO, M., SIMAO, A., STAMOU, G., TOMASI, N., USAI, D., VACCA, A., (1997): "The effect of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions". *Catena* 29, 45-59.
- KULITEK M. & NIELSEN D.R. (1994): *Soil Hydrology*. Geo ecology. Text Book..
- LAVEE, H, IMESON, A.C, SARAH, P. (1998): "The impact of climate change on geomorphology and desertification along a Mediterranean – arid transect". *Land Degradation and Development*, 9, 407-422.
- LÓPEZ-BERMÚDEZ, F., MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J., ROMERO-DÍAZ, A. (1995) "Land use and soil-vegetation relationships in a Mediterranean ecosystem: El Ardal Murcia, Spain". *Catena* 25, , 153-167.
- MINTEGUI AGUIRRE, J.A. y LÓPEZ UNZU, F. (1990): *La ordenación agrohidrológica en la planificación*. Departamento de Agricultura y Pesca del Gobierno Vasco. Vitoria.
- PÉREZ LATORRE, A.; NIETO CALDERA, J. M. Y CABEZUDO, B. (1994): "Datos sobre la vegetación de Andalucía III. Series de vegetación caracterizada por *Quercus suber* L.". *Acta Botánica Malacitana*. 19, 169-183. Universidad de Málaga.

- SIEPEL A.C, STEENHUIS T.S, ROSE C.W, PARLANGE J.Y, MCISAAC G.F. (2002): "A simplified hillslope erosion with vegetation elements for practical applications". *Journal of Hydrology*.
- SMITH, D.B., WEARN, H.J. (1970): "Water movement in the unsaturated zone of high and low permeability strata". International Atomic Energy Authority, Vienna, pp 73-81.
- TRAGSA: *Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión*.
- TRIMBLE, S.W. (1990): "Geomorphic effects of vegetation cover and management: some time and space considerations in prediction of erosion and sediment yield". In: Thornes, J.B. Ed. , *Vegetation and Erosion Processes and Environments*. Wiley, pp. 55-66.
- USÓN, A Y RAMOS MC. (2001): "A improved rainfall erosivity index obtained from experimental interrill soil losses in soils with a Mediterranean climate". *Catena*, 43,293-305.
- VEN TE CHOW et al. (1994): *Hidrologia aplicada*. Mc Graw Hill. Londres.
- WARD R.C. & ROBINSON M. (2000): *Principles of hydrology*. Mc Graw Hill. Londres.
- YAIR, A & LAVEEH, H. (1985): "Runoff generation in arid and semiarid zones". Anderson M.G. & Burt, T. P.: *Hydrological Forecasting*, 183-220. John Willey and sons LTD.