

ANÁLISIS DE FLUJOS DE PEQUEÑO CALADO EN LADERAS CON VEGETACIÓN NATURAL

R. García Díaz, J.A. Mintegui Aguirre & J.C. Robredo Sánchez

U.D. Hidráulica e Hidrología.- E.T.S. Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de MADRID

RESUMEN

El texto representa un intento por profundizar en el contenido hidráulico de uno de los temas más analizados y discutidos dentro del campo de la Hidrología Forestal; casi siempre desde perspectivas más bien cualitativas y empirismos más o menos relacionados con el fenómeno de la erosión hídrica.

Los resultados de las investigaciones más recientes sobre el tema, junto con la tradición especulativa en esta materia en nuestra Escuela de Montes, a lo que se unió la disponibilidad de un canal de ensayo de dimensiones adecuadas, para comprobar a priori la viabilidad de la experimentación en el campo; permitieron que entre los años 1994-95 se llevaran a cabo los ensayos que se comentan en Puebla de Valles (Guadalajara), cuyas conclusiones se exponen de forma resumida.

P.C.: canal de ensayo/de campo; laderas; número hidráulico; número de Mannig

1. ANTECEDENTES

El análisis de la circulación de flujos de escaso calado en canales cubiertos de vegetación ha sido objeto de numerosos estudios

sistemáticos. Como antecedentes se pueden citar los trabajos de W.D. REE y V.J. PALMER (1949); los modelos teóricos, sobre la resistencia que presenta al flujo la vegetación en canales, planteado por G.T. THOMPSON y J.A. ROBERSON (1975); o simulando para la vegetación material artificial flexible, como N. KOUWEN Y UNNY (1969, 1973) y T.Y. DAVID y B.J. BARFIELD (1978); ó utilizando vegetación artificial rígida para diferentes coberturas I. NEZU y K. ONITSUKA (1999); e incluso investigaciones sobre canales de hierba con diferentes densidades D.M. TEMPLE (1982), entre otros trabajos.

Ampliar el campo de actuación a flujos que circulan sobre lechos con vegetación natural, entendiéndose por tal la espontánea que resulta en los terrenos que han permanecido largo tiempo en barbecho, o en suelos que han sido repoblados con especies forestales, en laderas de pendientes entre moderadas y fuertes, suponía un reto que parecía interesante abordar.

Es el tema que se introduce en la presente comunicación, resultado de las investigaciones realizadas por la Unidad de Hidráulica e Hidrología de la E.T.S. Ingenieros de Montes, en colaboración con la Unidad de Selvicultura de la E.U.I.T. Forestal, ambas de la Universidad Politécnica de Madrid entre

los años 1994-95; tanto en el laboratorio de Hidráulica de la Escuela como en el campo, en este último se experimentó en unas laderas situadas en Puebla de Valles (Guadalajara).

2. OBJETIVOS

El objetivo general de la investigación se centra en el estudio del comportamiento de flujos de pequeño calado en lámina libre, sobre diferentes lechos cubiertos de vegetación natural y bajo diferentes pendientes.

En concreto, en los ensayos realizados se determinaron los valores de los números hidráulicos, Froude y Reynolds y los coeficientes de rugosidad de Manning, como medio para especificar los fenómenos observados dentro de unos baremos cuyos significados se conocen. Asimismo se registraron los ensayos en los que se produjeron regueros, calculándose en tales casos la tensión de arrastre resultante en la corriente.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

La investigación se inició en el canal del laboratorio de Hidráulica de la E.T.S. Ingenieros de Montes, a fin de visualizar los fenómenos en un medio controlado y adquirir experiencia sobre el modo de operar en los posteriores ensayos de campo; concretando, para establecer la metodología a seguir. Para ello se realizaron ensayos sobre lechos de diferentes rugosidades, en ocasiones simulando la vegetación, pero utilizando materiales artificiales. Tras esta etapa de laboratorio se continuó con los ensayos definitivos en los lechos naturales.

Para ello se diseñó y construyó un **canal de campo**, que fuera posible su instalación eventual en un lugar; realizar en él los ensayos y posteriormente poderse desmontar, transportar y volver a instalar fácilmente en otro lugar para un nuevo ensayo sobre otro lecho diferente. En concreto los elementos que constituyen el canal son:

1) *Depósito-vertedero superior*. Consiste en un depósito, fabricado en fibra de vidrio, donde se almacena el agua procedente de una bomba; tiene las dimensiones míni-

mas para estabilizar el flujo y realizar el vertido a través de un vertedero, donde se mide el caudal que desagua al canal.

2) *Paredes del canal*. Delimitan la superficie por donde fluye el agua y están constituidos por planchas de chapa galvanizada; cada plancha solapa a la siguiente a lo largo de toda la longitud del canal, siendo de fácil transporte e instalación.

3) *Deposito vertedero inferior*. Análogo al superior, pero con un doble fondo para retener acarreo.

4) *Agujas de medición*. Consistentes en alambres rígidos de acero, recubiertos en su parte inferior con una camisa de plástico milimetrada. Todas ellas van insertadas en un perfil metálico en forma de U invertida, que se clava en el suelo en la sección donde se quiere medir. La medición del calado se realiza cada 15 cm de separación a lo largo de toda la sección del canal.

Los ensayos requerían varios operarios, actuando de forma sincronizada para realizar las tareas de conducir el flujo de agua y efectuar las mediciones de los calados. La operación propiamente dicha comprendía dos fases: en *la primera* se vertía el agua al canal para que le empapara y disminuyera así al máximo la infiltración; esta fase del ensayo se mantenía hasta conseguir que la diferencia de caudal entrante y saliente por los vertederos fuera mínima; momento en el cual se podía admitir la existencia de una aproximación aceptable a un régimen permanente y uniforme; la segunda se iniciaba una vez conseguido el régimen permanente y uniforme y en ella se efectuaban los ensayos.

Conocido el caudal por medio de los vertederos (superior e inferior) y el valor de los calados para una sección efectuando las correspondientes mediciones, se estableció un calado medio por sección y aplicando la ecuación de continuidad se consiguió determinar su velocidad. Conocida ésta, aplicando la ecuación de Manning en un régimen permanente y uniforme, se determinó el correspondiente coeficiente de rugosidad de Manning en cada sección. Este proceso repetido en cada una de las secciones en las que

Tabla 1. Características de los lechos elegidos para los canales de ensayo en el campo

Lecho del ensayo	Características de la vegetación en el canal (especies dominantes)	PENDIENTE (%)
1.- HERBAZAL	Tapiz herbáceo formado por especies tales como el: <i>Dactylis sp.</i> , <i>Lolium sp.</i> , <i>Festuca sp.</i> , <i>Trifolium sp.</i> , familia <i>compositae</i> , etc	11,7
2.- MATORRAL SOBRE LABORES ANTERIORES	Vegetación herbácea con las mismas especies que el lecho 1. anterior, pero con menor cobertura. Matorral compuesto básicamente por: <i>Rosmarinus officinalis</i> , <i>Cistus ladanifer</i> , <i>Thymus sp</i>	29,5
3.- MATORRAL DE JARA Y ROMERO	Las mismas especies que en el lecho 2.; pero con predominio del matorral	37,0
4.- MATORRAL Y PINAR	Vegetación herbácea compuesta básicamente por gramíneas Matorral con especies dominantes <i>Cistus ladanifer</i> , <i>Rosmarinus officinalis</i> , <i>Thymus sp.</i> Vegetación arbórea: pies aislados de <i>Pinus pinaster</i>	15,3
5.- PINAR	Pinar en estado de latizal de <i>Pinus pinaster</i> y <i>Pinus nigra</i> . Matorral y herbazal como en el lecho anterior.	13,8
6.- PINAR	Pinar en estado de latizal de <i>Pinus pinaster</i> y <i>Pinus nigra</i> . Matorral y herbazal como en los lechos 4. y 5	15,2

se realizaron las mediciones, permitió obtener un valor medio por ensayo. Con los valores de la velocidad y del calado se definieron los números de Froude; Reynolds y Manning.

4. ÁREA DE LOS ENSAYOS DE CAMPO

El lugar elegido para establecer los lechos de los ensayos de campo fueron unas laderas en umbría, con diferentes grados de pendiente y tipos de cubierta vegetal, ubicadas en el término municipal de Puebla de Valles (Guadalajara), de coordenadas: 40° 56' de latitud; 3° 16' W longitud; 950 m de altitud; con suelos francos sobre rañas del Mioceno, cuyas características se detallan en la Tabla 1. adjunta.

5. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en los ensayos de los canales de campo se resumen en la Tabla 2.

6. DISCUSIÓN

Se trata de examinar y discutir el contenido de la Tabla 2.

Los resultados de los ensayos 1., 2. y 3., que se llevaron a cabo sobre un lecho de pendiente moderada (11,7%) y protegido por un pastizal natural no excesivamente tupido, pero cubriendo el 80 % de la superficie del suelo, son concluyentes:

A un aumento del calado h (m) como consecuencia del incremento de la descarga en el canal Q (m^3/s), le correspondió, como era de esperar, un aumento de la velocidad v de la lámina de escurrido (m/s), una disminución en el número de Manning, un incremento del número de Froude (aunque siempre dentro del régimen lento) y un incremento muy superior, pero correlativo, del número de Reynolds. Todo ello está de acuerdo con la teoría clásica de la Hidráulica de cauces abiertos, aunque matizado para las condiciones del canal específico utilizado en los ensayos.

Tabla 2. Resumen de los parámetros hidráulicos obtenidos en los ensayos realizados en los canales de campo

Ensayo núm	Características del canal		Caudal: Q (m ³ /s)	Calado: h (m.)	Velocidad media: v (m/s)	número de Manning: n	número de Froude: F	número de Reynolds: R
	Pend. (%)	Tipo de vegetación						
1	11,7	Pastizal	0,0042	0,029	0,129	0,244	0,242	3741
2	11,7	Pastizal	0,0151	0,046	0,293	0,143	0,436	13478
3	11,7	Pastizal	0,0270	0,061	0,395	0,125	0,510	24095
4	29,5	roza manual	0,0045	0,030	0,136	0,368	0,251	4080
5	29,5	roza manual	0,0083	0,031	0,243	0,211	0,441	7533
6	37,0	matorral de jara	0,0028	0,025	0,100	0,505	0,202	2500
7	37,0	matorral de jara	0,0133	0,032	0,371	0,158	0,663	11872
8	15,3	jaral y pinar	0,0031	0,019	0,141	0,190	0,326	2679
9	15,3	jaral y pinar	0,0061	0,020	0,263	0,106	0,594	5260
10	13,8	pinar (latizal)	0,0086	0,023	0,389	0,075	0,819	8947
11	15,5	pinar (latizal)	0,0035	0,018	0,177	0,147	0,421	3186

Se destaca que para una descarga pequeña ($Q = 0,0042 \text{ m}^3/\text{s} < 5 \text{ l/s}$, **ensayo 1.**) la lámina de agua discurre en un régimen de transición próximo al laminar ($R = 3.741$), que se corresponde con un número de Manning relativamente elevado $n = 0,244$. Los restantes valores no aportan aspectos significativos, dado que se está tratando con un lecho de pastizal.

En relación con los **ensayos 4. y 5.**, efectuados sobre una parcela de matorral en la que con anterioridad se había practicado una roza manual, cuya vegetación había rebrotado y en el momento de las pruebas alcanzaba una altura de unos 30 cm con cierto grado de homogeneidad, el aumento del caudal de $0,0045 \text{ m}^3/\text{s}$ a $0,0083 \text{ m}^3/\text{s}$ apenas influyó en el calado; variando de $0,030 \text{ m}$ a $0,031 \text{ m}$.

La explicación se podría encontrar en la circunstancia que las operaciones de roza aún mantenían parte de sus efectos preparatorios del terreno para las repoblaciones forestales; de manera que una porción del agua que circulara por el canal se incorporase a los perfiles interiores del terreno. Es también de destacar los elevados coeficientes de Manning que resultan en ambas pruebas.

En los **ensayos 6. y 7.**, realizados sobre matorral autóctono y prácticamente sin alterar de jara (*Cistus ladanifer*) y romero

(*Rosmarinus officinalis*), se cumplieron nuevamente los comportamientos analizados en los ensayos 1. y 2. pero marcadamente acentuados. En el **ensayo 6.** el flujo (de $0,0028 \text{ m}^3/\text{s} = 2,8 \text{ l/s}$) discurre en un régimen casi laminar ($R = 2.500$), con un número de Manning de $0,505$; para pasar en el **ensayo 7.** (en que el flujo asciende hasta $13,3 \text{ l/s}$.) a un movimiento claramente turbulento y un número de Manning de $0,158$. Esto puede explicar la razón por la que en montes provistos de este tipo de cubiertas vegetales, la emisión de sedimentos por los cursos que los drenan aumenta rápidamente, conforme se prolonga la duración del aguacero; a diferencia de las cubiertas constituidas por otras formaciones vegetales, en las que dicho efecto resulta más relanzado.

Conviene también tener en cuenta la fuerte pendiente de este canal (37%), a pesar de lo cual se aprecia la influencia reguladora de la vegetación sobre el régimen de escorrentía de la corriente; sobre todo para láminas de poco calado (**ensayo 6.**).

Los **ensayos 8. y 9.** se realizaron en un canal con una cubierta de vegetación similar, aunque el matorral inicial se encontraba salpicado de pies de *Pinus pinaster* y la pendiente del terreno era más moderada ($15,3\%$). Los resultados, como cabía esperar,

están en la misma línea pero más moderados.

Finalmente, el **ensayo 10.** resulta ligeramente atípico; lo que se debió a que el suelo del canal se encontraba totalmente cubierto de pinocha, de manera que al ponerse la lámina de escurrido en contacto con la misma, se originó una concentración del flujo (número de Manning 0,075); lo que no tiene porque responder a lo que en circunstancias normales ocurre con este tipo de suelos frente a una precipitación extraordinaria. Por el contrario, el **ensayo 11.** responde mucho mejor al comportamiento que se esperaba de un suelo forestal arbolado.

AGRADECIMIENTOS

Estos ensayos se iniciaron en el marco del Proyecto coordinado *Estudio de la eficacia protectora de las cubiertas forestales, de su implantación y tratamiento selvícola*; financiado por la CYCIT; en el marco del sub-proyecto dirigido por el Profesor Rafael Serrada; posteriormente recibieron el apoyo de la RESEL (DGPN del Ministerio del Medio Ambiente). Se reconoce el apoyo de ambos

Organismos en el desarrollo de la investigación; así como la comprensión y ayuda de los Servicios Forestales de la Comunidad de Castilla-La Mancha en Guadalajara y sobre todo al Concejo y vecinos de Puebla de Valles por permitirnos trabajar en terrenos de su municipio

También se agradece por su colaboración en trabajos de campo al profesor J.L. García Rodríguez y al ingeniero de Montes M. Guijarro Alonso.

BIBLIOGRAFÍA

NEZU, I., ONTSUKA, K. (1999) *3-d turbulent structures in partly vegetated open channel flows*. Environmental Hydraulics, L.J. Wang (editor).

TEMPLE, D.M. (1983) *Desing of Grass-lined open channels*. Transaction of the A.S.A.E., páginas 1064-1069.

DAVID, T.Y., BARFIELD, B.J. (1978) *Prediction of Flow Hydraulics for Vegetated Channels*, Transactions of the A.S.A.E.