

ESTUDIO DE LA PROTECCIÓN DE LA VEGETACIÓN ANTE LOS FLUJOS AGUAS DE ESCORRENTÍAS EN LADERAS NATURALES.

Ricardo García Díaz.

U. D. Hidráulica e Hidrología. Dpto. Ingeniería Forestal. E. T. S. Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria, 28040 Madrid.
rgardiaz@montes.upm.es

Resumen.

En la presente comunicación se expone el comportamiento de la vegetación ante los flujos de escorrentía, se tienen en cuenta algunas investigaciones realizadas sobre la resistencia que ofrece la vegetación a los flujos de escorrentías. Estas investigaciones básicamente estudian el coeficiente de rugosidad de Manning con lechos de vegetación (artificial y natural) y las tensiones de arrastre correspondientes, a partir de ellas se comprueba la gran protección que ofrece el estrato herbáceo, disminuyendo la velocidad a cotas muy pequeñas. En base a estas investigaciones complementada con la observación directa, se analiza el comportamiento de los tres estratos de vegetación es decir herbáceo, matorral y el arbóreo, como actúan estos distintos tipos de vegetación ante el escurrimiento y así determinar que la estructura ideal para la protección del suelo ante los flujos de escorrentía es la formada por la mezcla de los tres estratos.

Abstract.

This work explains the behaviour of vegetation under different run-off flows. With that aim, a review is made of research carried out to this date about resistance of vegetation to run-off flows, which are normally focused on the analysis of Manning roughness coefficient, on vegetated bed (natural and artificial) and their corresponding shearing stresses. On the basis of these relationships, high protection offered by herbaceous stratum is proved, by a diminishing of velocity at very low depths. Assessment of the behaviour of three different vegetation strata (i.e., herbs, shrubs and trees) under run-off is fulfilled both by means of this analysis and by empirical observations. That way, it is possible to determine that the ideal structure for soil protection under run-off flows is that composed of a mixture of all those three strata.

KEY WORD: shearing stress, soil protection, bed, coefficient of roughness.

INTRODUCCIÓN

La protección que ofrece la vegetación ante la erosión hídrica se desarrolla de la siguiente manera. La primera protección consiste en lo que se puede definir como efecto de “pantalla”, por el cual el agua procedente de lluvia choca contra la parte aérea de la vegetación, fundamentalmente contra la copa de los árboles (en el caso de que estos existan) perdiendo la energía cinética que transportan las gotas en su caída, Simultáneamente una gran parte del agua procedente de la lluvia se queda “interceptada” por la vegetación, la parte de agua que no ha llegado al suelo, alimenta los caudales de escorrentías por las laderas, aún así también en esta fase, debido a la vegetación, parte del agua de escorrentía se infiltra dentro del suelo, ya por último la fracción de agua que definitivamente desciende por la ladera es frenada por la vegetación, este último fenómeno es el que se estudia en esta comunicación.

RESISTENCIA DEL ESTRATO HERBÁCEO.

Son numerosas las investigaciones realizadas sobre la resistencia que ofrece la vegetación herbácea al flujo de escorrentía. De todas ellas para el objetivo del presente estudio destacan las realizadas por TEMPLE (1983) y STEPHAN U., GUTKNECHT D. (2002), en estas investigaciones se comprueba que el comportamiento del flujo es distinto dentro del seno de la vegetación en relación al comportamiento que se produce por encima de la misma. Dentro del seno de la vegetación, la velocidad depende del tipo de vegetación y de la densidad tamaño y disposición de las plantas, sin embargo apenas depende del calado y de la pendiente. Por encima de la vegetación la velocidad sigue la ley logarítmica.

Los estudios sobre la resistencia al tapiz de hierba se han realizado en función de alguno de los dos parámetros hidráulicos siguientes: el coeficiente de rugosidad de Manning o la tensión hidráulica de arrastre.

Teniendo en cuenta las conclusiones de las investigaciones y la propia observación directa de los flujos de escurrimiento se puede afirmar que en un tapiz herbáceo cuando el número de tallos es bastante alto (por ejemplo los existentes en un prado de siega o en pastizales del norte de España) y por lo tanto relativamente denso, éste llega a ser lo suficientemente eficaz frente a la tensión de arrastre que ejerce el flujo de agua de tal forma que se puede asegurar que evita la erosión sobre las partículas del suelo.

TEMPLE D. M. (1983) considera que la capacidad de protección de un recubrimiento de césped es el resultado de las acciones separadas pero relacionadas:

- Una región cerrada de amortiguamiento hasta un límite en la cual la velocidad es muy reducida. La acción es un resultado directo de la resistencia del vegetal que se transmite al suelo a través del tallo y el sistema radical. Porque esta región representa una distorsión del perfil de velocidad.
- La segunda acción del césped es el impedir local y temporalmente altas velocidades y tensiones cortantes en la región asociada al grado de protección, está dominado por la uniformidad en la cubierta del suelo y es relativamente independiente de la resistencia del flujo.

En esta zona, a la cual TEMPLE la define como región cerrada, prácticamente se puede asegurar que el agua aunque este en contacto con el suelo circula a una velocidad muy pequeña, puesto que la red de tallos y hojas de la vegetación herbácea impide que se produzca una velocidad de cierta intensidad. Estos resultados se reflejan en la curva del perfil de velocidades realizada por DARREL M. y TEMPLE M. (1986).

Las investigaciones de STEPHAN U., y GUTKNECHT D. (2002) y posteriormente JÄRVELA J. (2004) confirman este echo.

En la figura 1 se muestra que la curva típica del perfil de velocidades se sitúa o nace por encima de la altura $h_{p,m}$ siendo esta la altura de desviación de la velocidad, estando normalmente muy cercana a la altura de la vegetación $h_{p,up}$.

El nuevo perfil de velocidades parte de la ley logarítmica de Plant, modificada posteriormente por Nikuradse:

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{k} \ln \frac{z}{k_s} + C$$

Donde: u es la velocidad en la ordenada z . u^* es la velocidad de rotura, relacionada con la velocidad media del flujo U , por medio de la ecuación:

$$\frac{U}{u^*} = \sqrt{\frac{8}{f}}$$

k , es la constante de von Karman. k_s es la rugosidad equivalente de la arena. z la coordenada vertical. C la constante de integración, toma el valor de 8,5 (NIKURADSE (1993)).

STEPHAN U., GUTNECHT D. (2002) realizó la particularización para el caso que esta estudiando, llegando a la siguiente expresión:

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{k} \ln \frac{z - h_{p,m}}{h_{p,m}} + 8,5$$

Donde:

k es 0,4 (KIRINTO and GRAFF, 1992)

$h_{p,m}$ es la altura disminuida por la vegetación, por debajo de la misma la velocidad no se comporta con la ley logarítmica (ver figura 1).

El valor de u^* también depende del valor de $h_{p,m}$:

$$u^* = \sqrt{g(h - h_{p,m})S}$$

Donde S es la pendiente. Como se puede apreciar esta velocidad se reduce en función del valor de la altura de disminuida por la vegetación.

También se puede abordar la resistencia al flujo desde el punto de vista de la tensión de arrastre. TEMPLE (1980) lo expresa de forma aproximada:

$$\tau = \gamma h j (1 - C_F) (n_s/n)$$

La expresión normal de la tensión de arrastre ($\tau = \gamma h j$) se ve disminuida por el coeficiente C_F (factor de cobertura vegetal, el cual varía desde un valor de 0,5 para plantas anuales con una densidad de 538 elementos/m² hasta 0,90 para césped de densidad de 5.380 elementos /m²) y la relación entre n_s (coeficiente de rugosidad de Manning correspondiente al suelo, se acepta de 0,0156) y n (coeficiente de rugosidad de Manning total). Si bien, el mismo autor comenta que esta expresión debe de ser comprobada. En esta expresión se refleja la pérdida cuantitativa de la tensión de arrastre debido a la vegetación. Por ejemplo supongamos que el valor del coeficiente C_F es igual a 0,75, un valor intermedio, y el valor del coeficiente de rugosidad de Manning es de 0,1, con estas condiciones el valor de la tensión de arrastre quedaría del orden de:

$$\tau = \gamma h j (1 - 0,75) (0,0156/0,1) = \gamma h j 0,0312$$

Es decir que es alrededor de 30 veces más pequeña que la tensión de arrastre sin cubierta herbácea.

Como se comento anteriormente el coeficiente de rugosidad de Manning es un parámetro válido para cuantificar la resistencia de la vegetación, en este sentido PETRYK S. y G. BOSMOJIAN (1975) expresan el coeficiente de rugosidad de Manning en función del número de la densidad de los tallos, esta expresión es:

$$n = \left(n_o^2 + \frac{C_d}{2g} DH^{4/3} \right)^{1/2}$$

donde:

n_o , es el coeficiente de rugosidad de Manning correspondiente al suelo, sin el efecto de la vegetación. C_d es el coeficiente de resistencia de los elementos de la vegetación, en bastantes casos toma el valor 1. $D = \Sigma A / H L$ (representa la densidad por unidad de anchura). A es la proyección del área de cada elemento de vegetación en la sección perpendicular al flujo. H es la altura del calado. L es la longitud del tramo.

D también se puede expresar como:

$$D = d n \text{ (diámetro del elemento por el número de elementos por unidad de área).}$$

Cuando la rugosidad del suelo es pequeña con respecto a la rugosidad de la vegetación, se puede despreciar el sumando de n_o entonces la expresión del coeficiente de rugosidad de Manning adquiere la forma de:

$$n = \sqrt{\left(\frac{C_d}{2g} DH^{4/3} \right)}$$

Sustituyendo este valor en la ecuación de Manning y operando se obtiene el valor:

$$V = \sqrt{\frac{2g}{C_d D}} \sqrt{s}$$

En este caso la fuerza de los elementos de vegetación es la causante de la resistencia al flujo, la velocidad del flujo solo depende de las características de la vegetación de la pendiente y por el contrario no depende del calado.

En función de las expresiones anteriores y de los ensayos realizados por JIM C-X, and al.(2000) se ha comprobado que para una densidad de 15 (es un valor medio) la velocidad del flujo no supera los 0,15 m/s independientemente del valor del calado puesto que no depende de este.

Además de estas características se deben de tener en cuenta la propiedad de flexibilidad que posee la vegetación herbácea. La flexibilidad de la hierba hace que el comportamiento de esta frente al flujo hidráulico sea distinto, según la cuantía de este; cuando el flujo es pequeño, la tensión hidráulica, (dependiente del calado), también es pequeña y los tallos de hierba reaccionan como elementos rígidos, por el contrario al aumentar el caudal y el calado o profundidad aumenta la tensión de arrastre, la resistencia que ofrece la hierba no es capaz de soportar esta tensión y flexiona longitudinalmente sobre su propio tallo disminuyendo la superficie que ofrece al flujo y consecuentemente su resistencia al flujo, si bien en este caso

disminuye la resistencia al flujo y la erosión también supone una medida de supervivencia porque con la flexión, se consigue evitar la rotura del tallo, circunstancia que no podría realizarse si el tallo estuviera lignificado.

La Hojarasca y el musgo, también actúan positivamente evitando la erosión laminar. En aquellas superficies de matorral donde se produzcan unas buenas condiciones que hagan proliferar la existencia de pies de matorral y abundante hojarasca que imposibilitan el desarrollo del estrato herbáceo, esta estructura de matorral denso con la hojarasca y los restos vegetales forman una protección a la erosión laminar parecida al estrato herbáceo. El musgo crea un tapiz tupido y resistente al flujo hidráulico por lo tanto también se le debe de considerar como una protección eficaz a la erosión hidráulica. Ahora bien se debe de tener en cuenta que estos dos tipos de vegetación existen en situaciones muy poco frecuentes.

RESISTENCIA QUE OFRECE EL MATORRAL Y EL ARBOLADO.

La resistencia que ofrece el matorral a los flujos de escorrentía no está tan estudiada como en el caso de las plantas herbáceas.

La zona donde se produce la erosión es la zona de contacto con el suelo, cuando los calados son pequeños se puede considerar el matorral como elementos verticales insertos en el suelo. El matorral ofrece varios efectos en los flujos de escorrentía. Cuando el flujo de agua se aproxima a un tallo, la parte del caudal que llega a él, lo desvía lateralmente, produciendo por tanto una contracción del flujo tanto más grande cuando más cercano se encuentre otro tallo cercano al anterior. Sobrepasado este estrechamiento se produce una expansión con una pérdida de carga (efecto rejilla) que en teoría se puede cuantificar por la fórmula de Borda (ver figura 1):

$$h_B = \left(\frac{b+e}{mb} - 1 \right)^2 \frac{v^2}{2g}$$

Donde: h_B es la pérdida de carga por el efecto de rejilla, b es la separación entre dos elementos verticales, m es el coeficiente de contracción, para elementos redondeados toma el valor de 0,90, (ver figura 2).

Esta pérdida de carga tiene un efecto positivo porque cuanto más pérdida de carga sufra el fluido menor energía tendrá y consecuentemente menos poder destructivo.

Además de este fenómeno, es importante considerar que parte de la tensión que soporta el tallo debido a la presión sobre el elemento vertical, tanto hidrostática como hidrodinámica, es transferida al suelo por las raíces, por lo tanto cuanto mayor y más profundo sea el sistema radical, mayor y más segura será la sujeción de la planta al suelo y por lo tanto menor la probabilidad de que se produzca una rotura del mismo. Evidentemente como el matorral está lignificado la resistencia que tienen sus raíces son superiores a las raíces de las plantas herbáceas. Además de mayor dimensión.

Según lo expuesto se puede pensar que aquellas especies de matorral que al nivel del suelo presenten mayor número de pies mayor resistencia ofrecerán al flujo.

Esta conclusión no es exacta en su totalidad. Existe un efecto negativo en cuanto a la protección que ofrece los tallos del matorral, que también se puede producir en los árboles. El efecto se produce cuando el flujo llega a un elemento vertical se desvía hacia la derecha o hacia la izquierda, por lo tanto en la zona inmediata al punto donde se inserta el tallo en el suelo se produce un flujo superior al normal de la sección, justamente en la circunferencia inmediata al tallo se produce un calado superior al normal y a veces produce un aumento de la erosión, provocado por la presencia del tallo, siempre y cuando en esta zona no existan otros elementos de vegetación que eviten esta erosión, como por ejemplo la existencia de hierba, de ahí la importancia de plantas herbáceas debajo del matorral, porque con ellas, se elimina este tipo de erosión.

Cuando se ha producido la erosión laminar y ha desaparecido las capas superficiales del suelo, la existencia de raíces de un tamaño considerablemente grande actúan como una red que impide que la erosión aumente. Llegado a este punto las raíces de las plantas herbáceas no son lo suficientemente resistentes dado su pequeño tamaño y su poca consistencia por la ausencia de lignificación, en cambio las raíces de los matorrales sí que realizan este cometido, hasta una profundidad determinada, normalmente no muy grande.

El arbolado también produce el efecto protector de las raíces análogo al del matorral pero lógicamente con

mucha mayor protección. La protección del arbolado puede alcanzar la profundidad de las raíces. En los casos en que el suelo presente tendencia a provocar erosión en barrancos y cárcavas, una vez iniciados estos, es el arbolado el único estrato válido para mitigar el avance de estos tipos de erosión.

El arbolado además presenta un sistema radical de mayor longitud, sus elementos poseen un diámetro de mayor dimensión, consiguiendo transmitir al suelo una mayor tensión procedente de la parte aérea.

La red que forman las raíces de los árboles es la estructura más perfecta para evitar las erosiones en regueros y/o en cárcavas y barrancos. Normalmente los matorrales no poseen estas redes tan consistentes debido a sus menores dimensiones, tanto en longitud como en espesor, y no pueden evitar la progresión de los regueros una vez que estos se han formado.

CONCLUSIONES.

- La hierba con un grado alto de cobertura elimina la erosión laminar, si bien también el matorral y el arbolado actúan positivamente en todos los tipos de erosión, en el caso de la erosión laminar solo se puede asegurar su desaparición en su totalidad con la existencia de un sustrato de tapiz herbáceo.
- El matorral complementa a la hierba aumentando la resistencia a la progresión de los regueros, su presencia es positiva, Cuanto mayor sea la densidad de los tallos verticales de matorral mayor será la resistencia, siempre que permita el desarrollo de la hierba, por ello en el caso del jaral de *Cistus ladanifer* dada su halelopatía hacia las plantas herbáceas lo cual provoca una disminución notoria de resistencia a la erosión hídrica. En la España mediterránea debido a la existencia del periodo seco, durante el cual se produce el agostamiento de la hierba y esta pierde toda la resistividad a la erosión laminar, es indispensable la existencia de matorral, para paliar la eliminación de la hierba verde.
- En las zonas más xerófilas evidentemente la sola existencia de cualquier tipo de vegetación en mayor o menor grado disminuirá la erosión hídrica, si bien formaciones del tipo “macolla” en las cuales se apilontonan los tallos en montones, como es el caso del espartizal (ver figura 3) al no cubrir toda la sección, cuando existe pendiente el flujo se concentra entre macolla y macolla, produciéndose una mayor tensión hidráulica y por lo tanto un aumento del poder erosivo de la escorrentía. En este caso se debe de intentar complementar esta estructura con otras especies herbáceas o matorral y en el mejor de los casos de arbolado.
- La presencia del arbolado es una garantía para evitar o eliminar erosión en regueros, en cárcavas y en barrancos o movimientos en masa, porque en estos casos de erosión es insuficiente el estrato herbáceo y el de matorral. La red de sujeción del suelo que forman las raíces de los árboles es la mejor solución a la estabilidad del suelo.
- La mejor estructura de vegetación sería la que presenta los tres estratos, es decir el estrato de vegetación herbácea, de matorral y arbóreo (ver figura 4). Al existir los tres estratos de vegetación se produce una mayor estructura más eficaz para prevenir la erosión hídrica de escorrentía, e igualmente los sistemas radicales se complementan entre los distintos estratos.

Con la vegetación herbácea se consigue prevenir la erosión laminar, siempre y cuando esta se mantenga verde y con una densidad adecuada y en el suelo no se haya iniciado un proceso de erosión en regueros, en barrancos o en cárcavas.

La vegetación de matorral, entendiéndose por tal también los pies pequeños de arbolado, complementa a la vegetación herbácea, en especial en las zonas donde se produce el agostamiento de la hierba por falta de humedad, prácticamente en toda la España mediterránea, en este periodo, la hierba no cumple sus funciones o a desaparecido, si no existe matorral el suelo se queda desprotegido, si bien el matorral no es suficiente para prevenir la erosión laminar, en algunos casos es eficaz contra la erosión en regueros.

El arbolado complementa al estrato herbáceo y al matorral. El arbolado es el único medio eficaz de prevenir o eliminar la erosión en barrancos y cárcavas y algunos tipos de erosión en masa.

BIBLIOGRAFIA

ESCRIBA DE BONAFÉ D.1988, Hidráulica para Ingenieros ed. Bellisco Madrid.

JÄRVELA J. 2004 Effect of submerged flexible vegetation on flow structure and resistance. J Hydrol. **Volume**

KIRONTO B.; GRAF W.H. 1992 Turbulence Characteristics in rough uniform open-channel flow. Rapport Annuel. Laboratoire de Recherches Hydrauliques. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

NIKURADSE J. 1993 . Strömungsgesetze in rauhen Rohren Forschungsheft 391.Ausgabe B. Band 4.

PETRYK S. and BOSMAJIAN G. III 1975 Analysis of flow Through Vegetation. Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol 101 No HY7, July 1975 pp 871-884

STEPHAN U., GUTNECHT D.2002 Hydraulic resistance of submerged flexible vegetation. J Hydrol. Volume 269. 27-43.

TEMPLE D. M. 1983 Design of grass-lined open channels. Transaction of the ASAE Vol 26 No 4 1064.1069

--	--

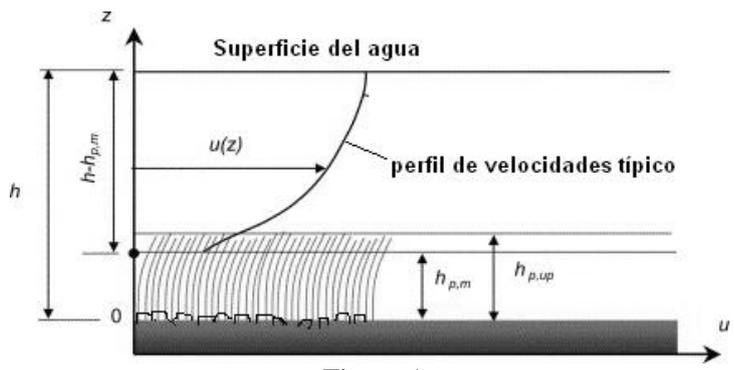


Figura 1

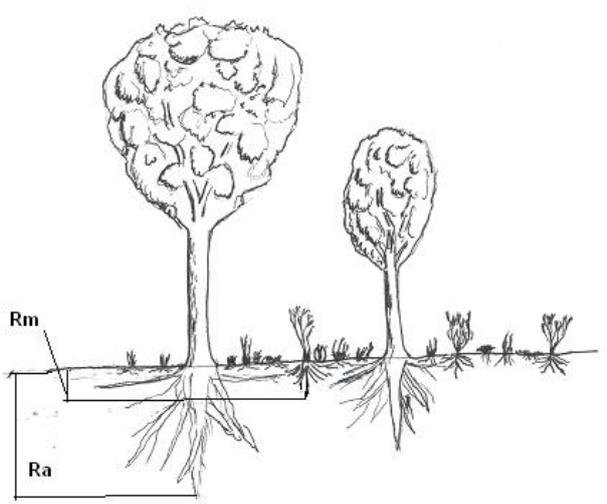


Figura 4

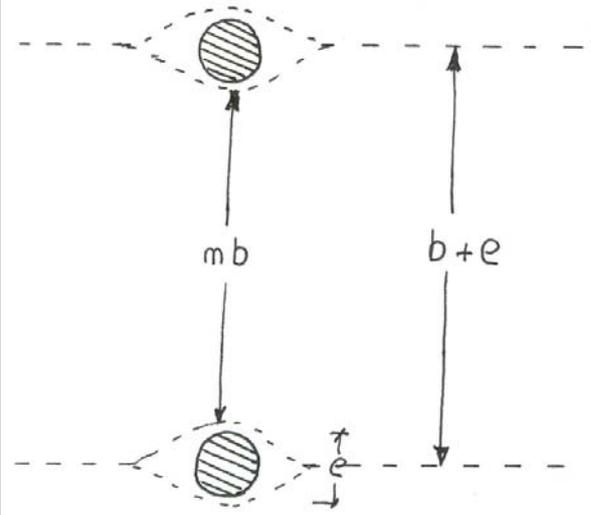


Figura 2

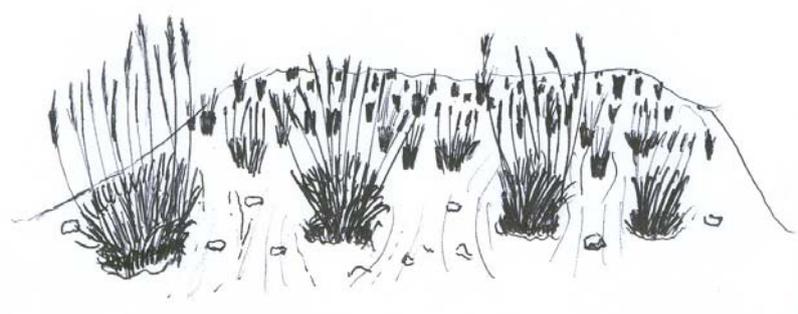


Figura 3