

Estrés hidráulico crítico de suelos forestales bajo distinto uso, en un sector de la Cordillera de la Costa de la VII región ⁽¹⁾

Mancilla, G. ⁽²⁾, Marambio, C. ⁽²⁾

⁽²⁾ Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, Casilla 9206, Santiago. Chile. gmancill@uchile.cl

INTRODUCCION

Los modelos de erosión con base física consideran en general que las coberturas de bosques aminoran casi en su totalidad dicho proceso de degradación del suelo. Este hecho no sería tal tras una situación de cosecha, en donde quedan áreas sin protección ante el impacto de la gota de lluvia y la escorrentía superficial. Como ejemplo, se pueden citar áreas del sector cordillerano costero de la Región del Maule, en la cual la vulnerabilidad de los sistemas naturales y edáficos se incrementa con la presión que se ejerce durante las faenas de manejo de los recursos forestales.

Los procesos físicos representados en la modelación de fenómenos tienen como uno de sus parámetros más controvertidos al esfuerzo hidráulico crítico. Este parámetro ha sido determinado primordialmente para terrenos agrícolas, con una nula acción en terrenos de aptitud forestal. En este sentido, los avances en la modelación de los procesos erosivos se verán enriquecidos si existen experiencias relacionadas a la evaluación del esfuerzo hidráulico crítico en situaciones de uso forestal.

El esfuerzo hidráulico crítico (τ_c) es definido como el estrés hidráulico a partir del cual partículas de suelo comienzan a ser removidas por la escorrentía superficial (Mancilla, 2004), correspondiendo en verdad a la presión ejercida por el agua que es suficiente para vencer la resistencia de las partículas (o agregados) del suelo.

⁽¹⁾ Financiado por la Dirección de Investigación de la Universidad de Chile, proyecto de reinserción DI – 1418.

La representación matemática del esfuerzo hidráulico crítico es:

$$\tau_c = \rho * g * R_h * S_f$$

De donde τ_c es el estrés crítico del flujo de agua (Pa); ρ corresponde a la densidad del agua (kg m^{-3}); g es la aceleración de gravedad (m s^{-2}); R_h es el radio hidráulico (m) y S_f representa a la pendiente de fricción (m-m^{-1}).

El esfuerzo crítico de corte tiene características de ser temporal y espacialmente variable, aunque este aspecto es de difícil experimentación. En relación a esto, investigadores como Nearing (1991) le atribuyen un carácter estocástico al esfuerzo hidráulico crítico. Sin embargo, no existe una metodología estandarizada o de aceptación general para la determinación del esfuerzo hidráulico crítico. A este respecto, la observación visual del instante en que las partículas de suelo comienzan a ser removidas es una alternativa válida.

No obstante lo anterior, la mayor parte de las estimaciones de esfuerzo hidráulico crítico derivan del método de ajuste de regresión, el cual consiste en el establecimiento de una línea recta fijada por el esfuerzo de corte como variable independiente, y la tasa de remoción de partículas como variable dependiente, asumiendo una relación lineal entre dichos factores. Bajo este concepto, el esfuerzo crítico de corte corresponde al punto de esfuerzo donde la línea recta cruza la abscisa, o donde la tasa de remoción de suelo deja de ser cero. Si bien el método de ajuste de regresión es el más empleado en general, pierde aceptación por el hecho de que existen situaciones, tales como en Gilley *et al.* (1993) y Zhu *et al.* (2001), en que el estrés hidráulico crítico resultante es negativo, condición que contraviene la física y crea amplia incertidumbre.

Existen contados modelos de erosión hídrica que emplean en sus predicciones conceptos tales como la capacidad de remoción y la tasa de remoción de partículas. Aún así, estos son los modelos de erosión más aceptados. Dichos modelos suelen emplear alguna ecuación para estimar el esfuerzo hidráulico crítico. Como ejemplo, WEPP (Water Erosion Prediction Project) relacionó este parámetro con la textura del suelo, en la forma:

$$\tau_c = 2,67 + 6,5clay - 5,8vfs$$

Representando “*clay*” la fracción de arcilla del suelo, y “*vfs*” la fracción de arenas muy finas del suelo (entre 0,1 y 0,05 mm).

Otro estudio efectuado por Mancilla (2004) concluyó en una expresión que relaciona el esfuerzo hidráulico crítico a la densidad aparente del suelo, esta última como un indicador de la resistencia del suelo:

$$\tau_c = 0,008 * e^{0,004*b.d}$$

siendo *b.d* la densidad aparente del suelo ($\text{kg} - \text{m}^{-3}$).

La mayor parte de las determinaciones del esfuerzo hidráulico crítico se circunscriben a suelos agrícolas. Por ejemplo, y en el marco del proyecto WEPP, Elliot *et al.* (1989) y Gilley *et al.* (1993), determinaron valores promedios, que oscilaron entre -0,66 Pa para suelos de la serie Keith de Nebraska (textura franco) y 6,64 Pa para suelos de la serie Frederick de Meryland (textura franco limosa). Por otra parte, Mancilla (2004) determinó rangos de esfuerzo crítico de entre 0,33 y 3,6 Pa para suelos de la serie Palouse, de textura franco limosa.

La dificultad para estandarizar un método de determinación del esfuerzo hidráulico crítico ha llevado a efectuar experiencias de laboratorio, bajo condiciones controladas, lo cual es en sí una apreciable ventaja. Sin embargo, las experiencias de terreno tienen el beneficio anexo de trabajar sobre el suelo en condiciones reales, no replicables totalmente en laboratorio. En el trabajo de campo y con la finalidad de obtener resultados de manera más rápida y eficiente, está la alternativa de emplear flujo artificial, creando la condición para la remoción y transporte de sedimentos. Así, muestras de agua con sedimentos removidos son tomadas en períodos determinados de tiempo, estimando las concentraciones de partículas en laboratorio. Con estos datos, se efectúa un análisis de regresión, tal como fue descrito con anterioridad. Sin embargo, la observación del momento en el cual las partículas de suelo comienzan a ser removidas también permite determinar el estrés hidráulico al cual

esto ocurre, para lo cual es necesario conocer el radio hidráulico (o profundidad del flujo laminar), la temperatura del agua en el flujo y la pendiente de la fricción.

Debido a que en Chile no se han realizado trabajos de investigación relacionados a la determinación del esfuerzo hidráulico crítico en erosión de suelos, y menos en el ámbito de sistemas forestales, se estimó necesario estudiar este tema, dándole además un enfoque práctico. Esto es, asociar la determinación del parámetro a la posible variación que habría en suelos forestales sometidos a distintos usos. Así, el objetivo de este estudio fue determinar y comparar el estrés hidráulico crítico en suelos de aptitud forestal sometido a diferentes usos, en un sector de alta susceptibilidad a la erosión hídrica, como es la Cordillera de la Costa de la VII región.

Materiales y métodos

Lugar de estudio y sus características

Para este estudio se contó con los terrenos del Centro Experimental Forestal Dr. Justo Pastor León, perteneciente a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile. Este predio, con terrenos de aptitud forestal, se ubica en la VII Región, Comuna de Constitución y posee una superficie de 379,7 ha.

Este sector se circunscribe a un régimen térmico, con temperaturas medias que oscilan entre los 6,3°C y los 24,7°C. En el área caen anualmente 926 mm en promedio, con un déficit hídrico anual de 788 mm, con seis meses de período seco. La humedad relativa alcanza un valor medio anual de 78% (Santibáñez y Uribe, 1993).

Los suelos corresponden a la serie Constitución, la cual se compone de un complejo metamórfico de origen granítico que generan la asociación de suelos Pocillas (Peralta, 1976). El suelo en el área es de preferencia franco limoso, con pH un tanto ácido. El predio muestra un grado de erosión que, en general, es ligera, a pesar de que Márquez (1992) la clasifica como no aparente. Aún así, hay sectores con erosión grave, en la cual se verifican zanjas frecuentes y derrumbes que ocurren de preferencia en las proximidades de las carreteras y donde la vegetación es muy escasa.

La topografía del sector no es uniforme sino que variada, con amplia distribución de las pendientes, de entre 0 y más de 100% (Márquez, 1992). La vegetación se encuentra en toda la distribución topográfica, no obstante con una fuerte alteración. De hecho, el uso preferente del suelo son las plantaciones de *Pinus radiata* D. Don. Así también, existen ensayos de especies del género *Eucalyptus*, aunque de mucha menor extensión. En materia del bosque nativo, predomina la especie *Nothofagus glauca* (Phil.) Krasser.

Método

Para las determinaciones de esfuerzo hidráulico crítico se efectuaron ensayos de terreno durante el año 2006. En dichos ensayos se aplicó flujo artificial sobre pequeñas áreas limitadas por una estructura de parcela movable. Esto facilitó la replicación de los experimentos. Con el fin de extender el estudio a diversas situaciones de usos del suelo, se trabajó sobre cuatro tratamientos distintos, todos representativos de las condiciones habituales del sector:

- 1.- Plantación de pino radiata de 10 años, 1667 árboles por hectárea y con presencia de sotobosque.
- 2.- Plantación de pino radiata de 20 años, 833 árboles por hectárea y con presencia de sotobosque.
- 3.- Situación de quema de residuos post-cosecha de plantación de pino radiata.
- 4.- Renoval de Hualo.

La parcela de escurrimiento diseñada consistió en un área útil de 0,075 m², limitada por láminas rígidas de acero unidas en su parte superior por dos barras rígidas de metal (figura 1). En su sección trasera, la parcela constó de una caja metálica removible, con una tapa perforada en la parte superior que permitía el abastecimiento de agua, y una ranura en la

parte inferior para la salida de agua hacia la superficie útil de la parcela. Un tubo de PVC con orificios continuos se ubicó al interior de la caja metálica y tenía como fin diseminar de la manera más uniforme el agua en su salida hacia la superficie. No obstante, previo a ello y con la finalidad de asegurar la uniformidad del flujo saliente, se adosó una esponja dentro de la caja y envolviendo el tubo de PVC. El agua fue surtida a través de una manguera con llave de paso, asociada a contenedores del líquido, regulándose su flujo mediante un medidor. Previo al comienzo del flujo, los bordes de la parcela eran introducidos en el suelo cuidadosamente. Una vez que el flujo recorría la superficie útil de la parcela podía desaguar fácilmente, ya que la parcela era abierta en su sección de aguas abajo. Para facilitar esto y la toma de muestras, se adosaba una bandeja metálica con una lengüeta que se introducía bajo el suelo para ser fijada.

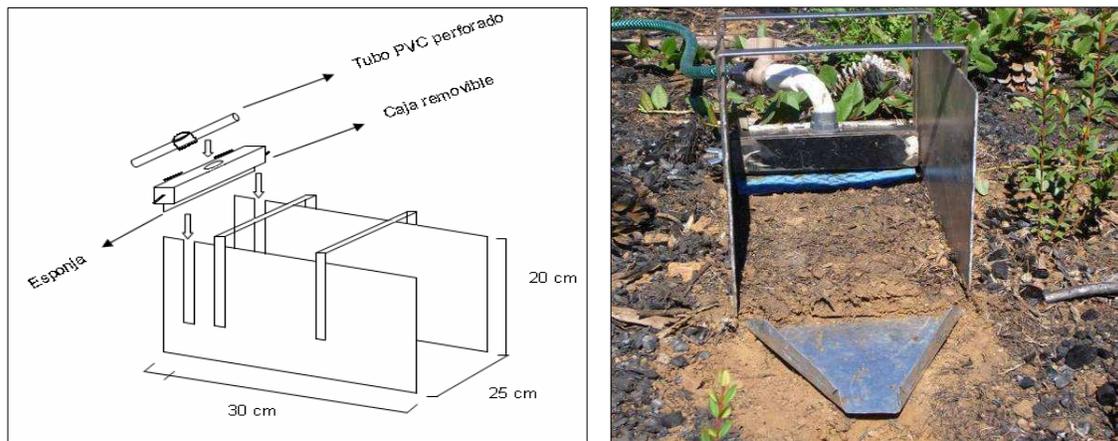


Figura 1: Esquema estructural de la parcela de escurrimiento movable (izquierda), y la versión construida, a escala real (derecha).

Los sectores puntuales en que se efectuaron los experimentos en cada uno de los tratamientos se localizaron en pendientes de entre 10 y 20%, cuidando evitar la excesiva rugosidad del sitio, dado que podría generar una concentración localizada del flujo de agua aplicado. Asimismo, antes del experimento, los residuos vegetales no descompuestos eran removidos, de manera tal de no interferir la visión del momento en que las partículas de suelo comenzaban a ser transportadas.

En cada tratamiento se llevaron a cabo 10 experimentos como mínimo. En los experimentos, se aplicó inicialmente un flujo de $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, el cual permaneció durante cinco minutos. Posteriormente, el flujo se aumentaba en $0,5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ cada 3 minutos, hasta asegurarse de que el estrés hidráulico crítico había sido alcanzado. En cada experimento se tomó al menos tres muestras de efluente saliendo de la parcela: la primera muestra correspondió al movimiento incipiente de partículas que fue observado; la segunda muestra se tomaba cuando el movimiento de partículas de suelo era evidente; la última muestra era tomada al momento de un transporte masivo de partículas del suelo. Además, era determinada la profundidad y temperatura de la lámina de agua, a fin de alimentar la fórmula de cálculo de los respectivos esfuerzos hidráulicos críticos. Para efectos de esta investigación y aplicando la definición del concepto al pie de la letra, se determinó por observación que el esfuerzo hidráulico crítico ocurrió cuando el movimiento de partículas de suelo era incipiente. Sin embargo, los datos colectados permitieron también comparar esta opción con los esfuerzos hidráulicos resultantes con el método de la regresión.

Los análisis de laboratorio se efectuaron en el Laboratorio de Suelos Forestales del Departamento de Silvicultura, en la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile. Esto implicó la determinación de la densidad aparente del suelo en donde se obtenían las muestras, el contenido de humedad del suelo asociado, la clase textural del suelo y por último la concentración de partículas en las muestras de efluente obtenidas.

Resultados

Se entregan los resultados promedios de los experimentos de estrés hidráulico crítico para cada tratamiento, así como el rango de valores encontrados:

Cuadro 1: Resultados medios y extremos de estrés hidráulico crítico en cada tratamiento

Tratamiento	Estrés hidráulico crítico mínimo observado (Pa)	Estrés hidráulico crítico máximo observado (Pa)	Estrés hidráulico medio observado (Pa)	Estrés hidráulico medio según regresión (Pa)
Plantación P. radiata 10 años	1,91	3,18	2,54	0,92
Plantación P. radiata 20 años	2,35	3,52	2,76	1,39
Quema de residuos post-cosecha	0,73	2,96	1,92	3,4
Renoval hualo	2,50	3,32	2,66	2,49

Análisis de los valores observados de estrés hidráulico crítico

Los valores observados registrados dejan en evidencia que las áreas con vegetación poseen un suelo más estable y resistente a la erosión debida al flujo de escorrentía superficial. Esto implicaría que, aún en el caso de Pino radiata, existe un aporte concreto de materia orgánica y elementos que favorecen la agregación de partículas de suelo y, por ende, mejoran la estructura y permeabilidad del medio edáfico. Sin embargo, hay que hacer notar que, aún sin descomponerse, los residuos vegetales y la cubierta vegetal en general protegen al suelo de la posibilidad de formación de flujo concentrado, habiendo de esa manera menor influencia de éste sobre las partículas de suelo, lo cual favorece el proceso de integración entre las partículas del suelo. En todo caso, entre los tratamientos con vegetación las diferencias son pequeñas, apareciendo el suelo que sostiene la plantación de Pino insigne de

20 años como levemente más resistente al flujo erosivo, de acuerdo a los valores medios de esfuerzo hidráulico crítico. No obstante, si se considera el valor mínimo observado como el indicador más confiable, entonces los suelos sobre los que se establece el renoval de hualo serían los más resistentes al flujo erosivo.

El análisis estadístico avaló los resultados anteriores, estableciendo que existieron diferencias significativas entre los valores de esfuerzo hidráulico crítico del tratamiento de quema de residuos post-cosecha y el resto de los tratamientos (cuadro 2).

Cuadro 2: Resultados del análisis de varianza y de la prueba estadística de Tukey (95%) entre los valores determinados de esfuerzo hidráulico crítico de cada tratamiento

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre tratamientos	4,33	3	1,44	5,67	0,003	2,87
Dentro de tratamientos	9,16	36	0,25			
Total	13,49	39				

Tratamiento	T2	T3	T4
T1	*	*	**
T2		*	**
T3			**

Análisis de los valores de estrés hidráulico crítico según método de regresión

La tendencia de los valores de estrés hidráulico crítico obtenidos por el método de la regresión en nada corresponde a lo observado en terreno, En efecto, según esta alternativa las partículas del suelo bajo el tratamiento de quema de residuos tras cosecha serían las menos susceptibles a ser removidas por el flujo hídrico. Al igual que en los casos de Gilley et al. (1993) y Zhu et al. (2001), el método de la regresión entrega resultados discutibles, reafirmando que obedece meramente a una resultante estadística, sin base ni interpretación física.

Discusión

Los resultados confirman la hipótesis lógica de que los suelos bajo cobertura vegetal podrían soportar de mejor manera un flujo hidráulico antes de comenzar a disgregarse. Esto se genera por la acción de la materia orgánica resultante de la descomposición de los residuos, la cual ejerce su efecto coloidal de favorecer la agregación de las partículas minerales de suelo, incrementando la estabilidad edáfica. Asimismo, dicho efecto beneficia la permeabilidad del suelo, retardando de esa manera la formación de escurrimiento superficial.

En conjunto con la acción anterior, la protección que otorgan los residuos al suelo permiten que este último se vea menos afectado por las gotas de lluvia o bien el escurrimiento superficial (Brooks et al., 1997; Giménez y Govers, 2008). Esto reduce la pérdida de suelos y permite aumentar la chance temporal y espacial de agregación y estructuración del medio edáfico.

Por otra parte, la quema de residuos afecta de sobremanera la estabilidad del suelo, haciéndolo muy susceptible a la erosión, aún a niveles de escorrentía superficial muy reducidos. Es usual asumir que el estrés hidráulico crítico depende de propiedades tales como la cohesión del suelo, la densidad aparente y el contenido de agua del suelo. Hay evidencias de que, una vez quemados, los suelos sufren procesos de hidrofobicidad, con lo cual las escorrentías tienden a ser mayores tras las quemadas y, por lo tanto, el arrastre de partículas de suelo y material carbonizado y no carbonizado es mayor (Varela et al, 2005). A partir de ahí comienza una leve recuperación, sin embargo, debido al incremento de la densidad aparente por la compactación generada por los eventos erosivos, lo cual hace también difícil la propagación de una nueva cubierta vegetal.

La escasez de estudios relacionados al estrés hidráulico crítico en suelos forestales hace difícilmente comparables los valores obtenidos en esta investigación. No obstante, las cifras están insertas en los rangos estimados por Elliot et al. (1989) para diversos suelos de

Estados Unidos y Mancilla (2004) para suelos franco limosos en la región noroeste de dicho país. Al respecto, los antecedentes entregados por esta investigación constituyen un punto de partida para comparaciones futuras en terrenos forestales.

Respecto al método de regresión, los resultados obtenidos confirman lo especificado por Nearing et al. (1994), en el sentido que constituye sólo una “entidad matemática”, sin significado físico, y que deriva de la linearización de una ecuación de remoción de partículas de suelo.

Conclusiones

El estrés hidráulico crítico, entendido como la resistencia máxima que un suelo puede ofrecer ante la acción erosiva de la escorrentía superficial, es estadísticamente mayor en suelos forestales que poseen vegetación y menor en áreas de reciente cosecha y quema de residuos, verificando dichos resultados en terrenos de la Cordillera de la Costa de la VII Región. Al respecto, los resultados de esta investigación indican que, tanto plantaciones de pino radiata como renovales de hualo, ejercen un efecto directo sobre la estabilidad del suelo, el cual va ligado más que nada al aporte de materia orgánica como coloide y al efecto protector aislante del escurrimiento superficial que ofrecen los residuos vegetales.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen el apoyo de la Dirección de Investigación de la Universidad de Chile, por el financiamiento otorgado a través del Proyecto de Reinserción DI-1418.

Literatura citada

- Brooks, K., Ffolliott, P., Gregersen, H., y DeBano, L., 1997. Hydrology and the management of watersheds, Second Edition. United States of America: Iowa State University Press, 502 pp.
- Elliot, W., Liebenow, A., Laflen, J., y Kohl, K., 1989. A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland field erodibility experiments 1987 & 88. NSREL Report N°. 3. The Ohio State University & USDA Agricultural Research Service.
- Gilley, J., Elliot, W., Laflen, J., y Simanton, J., 1993. Critical shear stress and critical flow rates for initiation of rilling. *Journal of Hydrology*, 142(1993): 251-271.
- Giménez, R., y G.Govers, 1998. Effects of freshly incorporated straw residue on rill erosion and hydraulics. *Catena*, 72: 214 – 223.
- Mancilla, G., 2004. Critical shear stress and rill sediment transport capacity of Palouse soil. Ph.D. Dissertation. Washington State University, College of Engineering and Architecture. 141 p.
- Márquez, O., 1992. Bases para la formulación de un plan de desarrollo en los predios experimentales “Las Brisas” y “Pantaniillos”, VII Región. Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniero Forestal. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Escuela de Ciencias Forestales. Santiago, Chile. 76 p.
- Nearing, M., 1991. A probabilistic model of soil detachment by shallow turbulent flow. *Transactions of the ASAE*, 34(1): 81-85.

- Nearing, M., Lane, L, y Lopes, V., 1994. Modeling soil erosion. *In*: Lal, R. (Ed.), Soil Erosion Research Methods, 2nd. Edition, Soil and Water Conservation Society and St. Lucie Press, Delray Beach, FL, pp. 127-156.
- Peralta, M. 1976. Uso, Clasificación y Conservación de Suelos. Chile: Servicio Agrícola y Ganadero. 340 p.
- Santibáñez, F. y Uribe, J. 1993. Atlas Agroclimático de Chile: Regiones VI, VII, VIII y IX región. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Departamento de Ingeniería y Suelos. Santiago. 65 p.
- Varela, M., Benito, E., y de Blas, E., 2005. Impact of wildfires on surface water repellency in soils of northwest Spain. *Hydrological Processes*, 19 (18): 3649 – 3657.
- Zhu, J., Gantzer, C., Anderson, S., Peyton, R., y Alberts, E., 2001. Comparison of concentrated-flow detachment equations for low shear stress. *Soil & Tillage Research*, 61(2001): 203-212.



UNIVERSIDAD DE
TALCA

*UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
4° CONGRESO CHILENO DE CIENCIAS FORESTALES*



Aceptación para publicación en plataforma virtual

Señores
Comisión Organizadora
4° Congreso Chileno de Ciencias Forestales
Universidad de Talca, Chile.

Estimados Señores

Quien suscribe, autores de la ponencia: "Estrés hidráulico de suelos forestales bajo distinto uso, en un sector de la Cordillera de la Costa de la VII región." autorizan a los organizadores del 4° Congreso Chileno de Ciencias Forestales, a la publicación del texto completo en la plataforma virtual *Dspace* de la Biblioteca de la Universidad de Talca, permitiendo con ello a su acceso a través de la Internet.

El texto, que se envió en formato Word, será transformado a formato pdf para su publicación. Su difusión estará disponible hasta el mes de Octubre del 2010.

Atentamente,

Gabriel Mancilla

Carlos Marambio

Talca, junio de 2009.