

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA

Memoria de Título

METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA ESTABILIDAD DE CAMELLONES

Camilo Francisco Sagredo Rodríguez

Santiago – Chile

2005

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA

METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA ESTABILIDAD DE CAMELLONES

Memoria para optar al Título Profesional de
Ingeniero Agrónomo
Mención: Manejo de Suelos y Aguas

Camilo Francisco Sagredo Rodríguez

PROFESORES GUÍAS	Calificaciones
Sr. Manuel Casanova Pinto Ingeniero Agrónomo, M.S.	7,0
Sr. Julio Haberland Arellano Ingeniero Agrónomo, Ph.D.	7,0
PROFESORES CONSEJEROS	
Sr. Carlos Benavides Zavala Ingeniero Agrónomo.	7,0
Sr. Walter Luzio Leighton Ingeniero Agrónomo, M.S.	7,0

Santiago – Chile

2005

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo y colaboración del Departamento de Ingeniería y Suelos de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile. En especial, a mis profesores guías Manuel Casanova y Julio Haberland, así como también a mis profesores consejeros Carlos Benavides y Walter Luzio.

Adicionalmente agradezco la participación de los profesores Osvaldo Salazar, Oscar Seguel, Claudio Fernández y Víctor García de Cortazar, cuyos aportes permitieron llevar a buen puerto esta investigación.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
MATERIALES Y MÉTODO.....	5
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	8
Condición inicial del suelo.....	8
Infiltración, escurrimiento y sedimento.....	8
Coeficiente de dispersión de arcilla.....	9
Ecuaciones explicativas.....	11
CONCLUSIONES.....	14
BIBLIOGRAFÍA.....	15
Apéndice I Descripción de suelo.....	18

RESUMEN

La labranza en camellones implica una alteración tal del suelo que aumenta su erodabilidad ante procesos erosivos, principalmente hídricos. Considerando que es posible estimar la magnitud de esta degradación a través de índices basados en propiedades físicas del suelo, el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la lluvia en un Mollisol de la zona central de Chile preparado en camellones, empleando un coeficiente de dispersión de arcilla (CD). Dos tratamientos de cobertura: suelo desnudo (T_1) y suelo cubierto en un 40 % con rastrojo de trigo (T_2), en unidades experimentales de $0,25 \text{ m}^2$, fueron sometidos durante tres horas a una intensidad simulada de precipitación de $37,3 \text{ mm h}^{-1}$. Los resultados obtenidos muestran que el cubrimiento superficial (T_2) aumentó el tiempo de inicio de escurrimiento, redujo el volumen total de escurrimiento así como también la pérdida de suelo, comparado con el tratamiento con suelo desnudo (T_1). A la vez en el T_1 , después de la simulación, se registraron los valores mayores del índice empleado (CD). Si bien la variación del CD, antes y después de la simulación, fue estadísticamente significativa dentro de cada tratamiento, estas diferencias no fueron detectadas entre tratamientos.

Finalmente, se definieron ecuaciones de predicción del CD, quedando expresada claramente que para las condiciones de esta investigación, los contenidos de arcilla (A) y arena (a) son determinantes de los valores del índice. Así queda definido como:

$$CD = 23,38 - 0,89 \cdot A + 0,17 \cdot a$$

$$R^2_{\text{ajustado}}: 0,73$$

Palabras clave: camellones, dispersión de arcilla, cobertura, erosión

ABSTRACT

Ridge plowing involves such soil alteration that soil's erodibility increases with erosive processes, mainly water erosion. Considering that is possible to estimate the magnitude of this degradation through some index, based on soil physical properties, the goal of this investigation was to evaluate the simulated rainfall effect on a ridge plowed Mollisoll of the central zone of Chile, using a clay dispersion coefficient (CD). Two treatments were defined, bare soil (T_1) and a 40% wheat residues soil cover (T_2). A rainfall intensity of $37,3 \text{ mm h}^{-1}$ during three hours was applied at the experimental units ($0,25 \text{ m}^2$). Comparing to bare soil (T_1), with the soil surface cover (T_2) an increased time of runoff initiation and a decreased total runoff volume (soil losses) were observed. Although a significant CD variation was observed after rainfall simulation inside each treatment, it was not observed between the treatments.

Finally, a prediction equation for CD was defined, being expressed clearly that for this work, both clay (A) and sand (a) are the most important variables:

$$CD = 23.38 - 0.89 \cdot A + 0.17 \cdot a$$

$$R^2_{\text{adjusted}}: 0.73$$

Key words: ridges, clay dispersion, cover, erosion.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la presión por ampliar la superficie cultivable ha llevado a la agricultura a una expansión hacia sectores con gradiente de pendiente cada vez mayores. Es en estos terrenos donde se identifican problemas de erosión causados directamente por patrones de labranza inadecuados. Al respecto, las tasas máximas de degradación de suelo se observan cuando las operaciones de labranza se realizan a favor de la pendiente, particularmente cuando el gradiente supera el 20%. Así, la pendiente y la redistribución del suelo actúan de manera sinérgica acentuando la erodabilidad o susceptibilidad del suelo a la erosión, en especial frente a agentes erosivos como el agua.

En particular, Chile presenta como condición natural características climáticas y orográficas que favorecen los procesos de erosión hídrica, tales como precipitaciones de erosividad elevada, concentradas en los meses de invierno, y una topografía accidentada (Ellies, 2000). Precisamente, en este escenario es donde el establecimiento de camellones, como sistema de labranza, se ha extendido en forma significativa, en especial para plantaciones frutales.

La construcción de camellones, al desplazar un volumen de suelo sobre la futura hilera de plantación aumenta la profundidad efectiva y modifica las propiedades físicas del suelo. Esto trae beneficios con relación al volumen explorado por las raíces, aumento del movimiento tanto del agua como de los gases, y disminución de la resistencia a la penetración (FAO, 2000). Por otro lado, las desventajas se asocian principalmente a las pérdidas de suelo originadas por la precipitación.

Una forma de reducir las pérdidas de suelo es utilizar una cubierta vegetal sobre la superficie, que actúe como una barrera que disipe la energía erosiva de las gotas de lluvia, fraccionándolas en gotas más pequeñas. De esta forma se reduce la compactación, el sellamiento y el escurrimiento superficial en el suelo (Shaxon *et al.*, 1989; Feng, 1995). Cuando el cubrimiento alcanza un 40% de la superficie total, las pérdidas de suelo se pueden reducir a un 10% del máximo observado sin cobertura; sin embargo, al sobrepasar el 60% de cubrimiento la erosión se reduce sólo fracciones pequeñas (Hudson, 1995; Shaxon *et al.*, 1989; Stocking, 1994).

Con relación a los procesos erosivos en camellones, domina la erosión de intercanalículos; esto es, el desprendimiento de partículas por efecto de la gota de lluvia y el transporte de sedimento en flujos precanalizados entre canalículos (Falhén, 1997; Shiono *et al.*, 2001).

Para evaluar directamente la erosión de intercanalículos, normalmente se recurre a cuantificar la cantidad de sedimentos contenidos en el escurrimiento superficial. No obstante, estas metodologías presentan a menudo dificultades en cuanto a la implementación del experimento y a las variaciones causadas por la precipitación natural en distintos sitios (Hudson, 1995). En este sentido, se han desarrollado metodologías predictivas, que en forma indirecta estiman el comportamiento posible del suelo ante la

erosión hídrica. Entre éstas, los modelos predictivos de erosión de intercanalículos corresponden a relaciones empíricas basadas en estudios que utilizan simuladores de lluvia en suelos distintos (Nearing *et al.*, 1994). Estos modelos incluyen parámetros que estiman la susceptibilidad que presenta el suelo a ser erosionado (erodabilidad) y la capacidad potencial de la lluvia de causar erosión (erosividad).

Si bien la erodabilidad y la erosividad son independientes entre sí, la determinación de esta última sólo es posible una vez que se produzca la erosión propiamente tal. De la misma manera, valores relativos de erodabilidad no son influenciados por la lluvia, pero su magnitud sólo puede ser establecida toda vez que ocurran estos eventos. Así, Hudson (1995) señala que para ser estudiados cuantitativamente, uno de ellos deberá permanecer invariable. Por lo tanto, manteniendo una intensidad de precipitación constante tanto la producción de sedimentos como los cambios físicos que experimente el suelo, serán un reflejo exclusivo de la erodabilidad del suelo, asociada al manejo.

Se han definido muchas relaciones integradoras (indicadores) entre la erodabilidad y las propiedades de los suelos para predecir su comportamiento frente a la erosión. Como una medida ya sea de la susceptibilidad o de la resistencia de los agregados al desprendimiento de partículas primarias, estos indicadores se basan en parámetros que pueden ser medidos en laboratorio. En este sentido, Lal y Elliot (1994) destacan a la estabilidad de agregados, las propiedades de transmisión o retención de agua, el impacto de la gota de lluvia (simuladores) y otros procesos secundarios, como determinantes del colapso de agregados. No obstante, es deseable que este indicador sea simple, fácilmente adaptable a mediciones de rutina, esté relacionado a otras propiedades cuantificables del suelo y que su uso permita el desarrollo de categorías de erodabilidad del suelo.

Una propiedad relacionada frecuentemente a la erodabilidad del suelo es la susceptibilidad de la fracción de arcilla a dispersarse en agua (Brubaker *et al.*, 1992). Esta dispersión a nivel de laboratorio involucra una adición de energía mecánica, equivalente a aquella producida naturalmente por la lluvia; de manera que es posible relacionar estas determinaciones de laboratorio con evaluaciones directas de erosión de suelos (Miller y Baharuddin, 1986).

Así entonces es posible establecer una relación entre la erosión intercanalículos, para una intensidad de precipitación controlada, con el grado de dispersividad de arcilla del suelo (Lal y Elliot, 1994). Este parámetro, correspondiente a la cantidad de arcilla que se desprende por efecto de la lluvia y su contenido total en el suelo -coeficiente de dispersión de arcilla- es una medida relativa de la susceptibilidad del suelo a ser erosionado, en cada evento de precipitación.

En consecuencia, el objetivo de esta investigación fue desarrollar una metodología que permita evaluar la erosión de un suelo de origen aluvial de la zona central de Chile, preparado en camellones, utilizando dos niveles de cobertura superficial con rastrojos.

MATERIALES Y MÉTODO

El ensayo se realizó en la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, en la Región Metropolitana (33° 40'S-70° 38'W, 625 m.s.n.m.). El suelo, de origen aluvial y ligeramente profundo, se presenta en una topografía plana, con o sin microrelieve, en una posición de un gran abanico aluvial. Corresponde a la Serie Santiago, familia arenosa esquelética, mixta, térmica de los Entic Haploxeroll (CIREN- Chile, 1996).

Se empleó un simulador de lluvia portátil, de manera que fue posible controlar la intensidad de precipitación, así como el tamaño de las gotas. Este equipo, de geometría cuadrada, cuenta con 256 emisores y una placa de suministro construida en acrílico rígido transparente con una capacidad aproximada de 5 L (Figura 1).

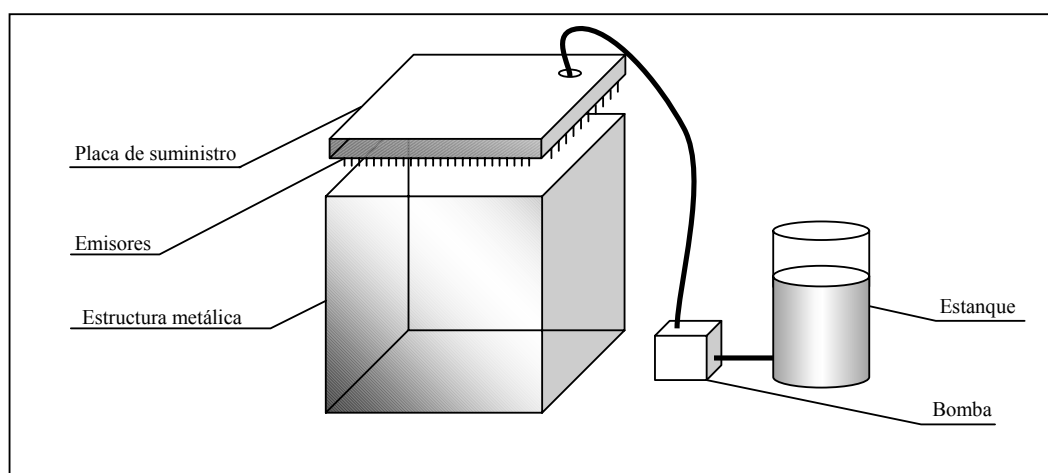


Figura 1. Esquema del simulador de lluvia, no a escala.

La placa de suministro reposa sobre una estructura metálica de 75 cm de altura que fue cubierta lateralmente con una lámina de polietileno, para evitar la deriva de las gotas causada por el viento. La placa de suministro es alimentada externamente con agua a caudal constante mediante una bomba peristáltica desde un estanque. La bomba consiste en un generador portátil alimentado por baterías y se regula mediante un microprocesador, que permite controlar la intensidad de precipitación deseada, con valores aproximados de 7 a 90 mm h⁻¹.

En la preparación del suelo se utilizó, en una primera etapa, un arado de discos para soltar el suelo. Luego, para la construcción de los camellones se empleó un arado rotatorio acondicionado para obtener camellones de 0,50 m de ancho, 0,25 m de alzada y un ancho de coronamiento de 0,20 m. La unidad experimental correspondió a una sección del camellón con un área de 0,25 m² (Figura 2). Así, la unidad experimental quedó completamente cubierta por el área de influencia del simulador de lluvia y mediante las dimensiones utilizadas se evitó la canalización del flujo superficial.

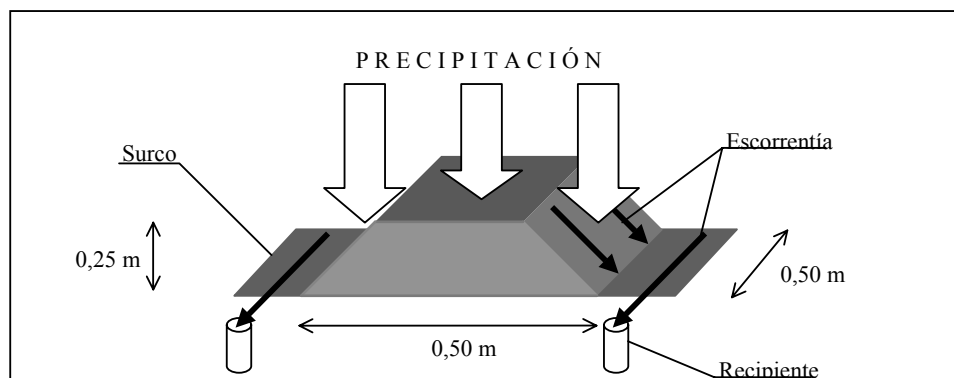


Figura 2. Representación gráfica de la unidad experimental.

Para el ensayo se utilizó un diseño completamente al azar, considerando 2 tratamientos con 18 repeticiones para cada uno. En el tratamiento 1 (T_1) la superficie del suelo se dejó completamente desnuda, mientras que en el tratamiento 2 (T_2) el camellón se cubrió en un 40% de su superficie, distribuyendo en forma homogénea residuos de cosecha de trigo. El porcentaje de cobertura se determinó a través del método línea transecto (Laflen *et al.*, 1981).

Con el propósito de obtener una lámina de escurrimiento superficial cada parcela fue sometida durante 3 horas a una intensidad de precipitación de $37,3 \text{ mm h}^{-1}$. Se registró el tiempo transcurrido entre el inicio de la precipitación y el inicio de la escorrentía, para luego determinar los volúmenes de escurrimiento y masa de sedimentos transportados en recipientes ubicados en los extremos de cada surco (Figura 2). A partir de dichos volúmenes se determinó la velocidad de infiltración promedio para cada tratamiento. Ambos surcos fueron impermeabilizados con plástico para evitar un aporte adicional de sedimentos de estas zonas hacia los recipientes, y a la vez, impedir la infiltración del flujo superficial.

Se midió la densidad real del suelo con picnómetros (Blake y Hartge, 1986a) y el contenido de materia orgánica por el método de Walkley y Black (Sadzawka *et al.*, 2000), ambas mediciones fueron hechas a partir de una muestra compuesta de los 3 cm más superficiales del suelo. La densidad aparente se determinó con cilindros antes y después de la construcción de los camellones hasta una profundidad de 10 cm (Blake y Hartge, 1986b). En cada unidad experimental, también antes y después de aplicada la precipitación, se determinó la textura con hidrómetro de Bouyoucos (Gee y Bauder, 1986).

Se calculó un coeficiente de dispersión de arcilla, en los 3 cm más superficiales del suelo, siguiendo el método descrito por González (1990). Se utilizó una muestra de 50 g de suelo (secado al aire y tamizado a 2 mm) que con agua destilada completa una suspensión de 1 L. Esta suspensión se agitó mecánicamente (con una varilla 20 veces), para luego de 2 h y a una profundidad de 10 cm, extraer con pipeta 25 mL de ella. Esta alícuota se secó a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ por 24 h, determinándose la masa de sedimentos contenida en dicha suspensión (MS_{2h}).

La masa seca de material suspendido al iniciar la sedimentación (MS_{0h}), fue estimada para 25 mL, asumiendo una distribución homogénea de los 50 g en la suspensión.

Así, el contenido de arcilla sin dispersante (a) se determina a través de la ecuación siguiente:

$$a = \frac{MS_{2h}}{MS_{0h}} \cdot 100 \quad [\text{ec. 1}]$$

Para determinar el contenido de arcilla dispersa (b), se empleó el método convencional del hidrómetro de Bouyoucos (Gee y Bauder, 1986), de manera que el coeficiente de dispersión de arcilla (CD) se obtuvo de la relación siguiente:

$$CD = \frac{a}{b} \cdot 100 \quad [\text{ec. 2}]$$

Se definió un nivel crítico de 25% para el coeficiente de dispersión de arcilla (González, 1990), de manera que bajo este umbral se esperaba que el suelo no presentara problemas de estructuración ni una susceptibilidad alta a la erosión.

El efecto de la precipitación simulada y la cobertura en la erodabilidad del suelo, se evaluó estadísticamente mediante análisis de varianza ($p \leq 0,05$). Los parámetros incluidos en cada análisis fueron los siguientes: CD, masa de sedimentos recolectada, volúmenes y tiempo de inicio de escorrentía, separados texturales y densidad aparente del suelo (disturbado) en el camellón. Particularmente, en el caso del CD y separados texturales se comparó la variación de CD producida entre la condición inicial (CD_i : antes de la simulación) y la final (CD_f : después de la simulación) entre tratamientos.

Mediante una regresión múltiple paso a paso ($p \leq 0,01$; $F = 4$), se establecieron relaciones empíricas orientadas a explicar el comportamiento del suelo, vía CD, ante la erosión por lluvia en cada tratamiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Condición inicial del suelo

En el Apéndice I (Descripción de suelo), se incluye la descripción morfológica completa del perfil y en el Cuadro 1 algunas de sus características superficiales, determinadas previamente al proceso de simulación de lluvia. Como se aprecia, el suelo inicialmente no mostró rangos restrictivos para la mayoría de las especies cultivadas de la zona. Adicionalmente no se aprecian rasgos evidentes de erosión.

Cuadro 1. Propiedades y estado iniciales del suelo

Arcilla	Limo	Arena	Da	Dr	M.O.	W
-----%-----			-----Mg m ⁻³ -----		-----%-----	
20,7 ± 0,01	34,2 ± 0,02	44,9 ± 0,02	1,29 ± 0,04	2,70 ± 0,02	1,81	1,10 ± <0,01

Da: Densidad aparente; **Dr:** Densidad real; **M.O.:** Materia orgánica; **W:** Contenido de agua; Intervalo de confianza al 95%

Los separados texturales definen a la clase textural de este suelo como franca y el valor de materia orgánica (M.O.) se encuentra dentro de las magnitudes normales señaladas para Mollisoles; esto es, 1,5-6,8% en los 15 cm superficiales del suelo (Brady y Weil, 1996). Así también, tanto la densidad aparente (Da) como la densidad real (Dr) del suelo son las esperadas para este tipo de suelo.

Si bien, después de la preparación de los camellones la Da disminuyó ($1,07 \pm 0,02 \text{ Mg m}^{-3}$), el valor nuevo no fue significativamente diferente entre los tratamientos. Al comenzar la simulación de la precipitación, cada parcela presentaba un contenido de agua gravimétrico (W) cercano a punto de marchitez permanente.

Infiltración, escurrimiento y sedimento

El volumen de agua infiltrado en el camellón fue muy cercano al volumen aplicado con el simulador, por lo cual la lámina de escurrimiento superficial presentó valores bajos en ambos tratamientos. No obstante, el tiempo de inicio de escurrimiento del T₁ (suelo desnudo) presentó una media significativamente inferior a la del T₂; 34,43 ($\pm 9,62$) minutos y 52,03 ($\pm 12,82$) minutos, respectivamente. Al respecto, Wilson *et al.* (2004), encontraron una tendencia similar aunque con tiempos de inicio de escurrimiento superiores en tratamientos con suelo cubierto.

A partir de los volúmenes totales de escurrimiento recolectados se estimó la velocidad de infiltración (V.I.) promedio para cada tratamiento (Cuadro 2). Landon (1984), señala que los valores de V.I. observados se consideran de una magnitud moderada y serían adecuados para riegos de superficie.

Cuadro 2. Promedio de infiltración, escurrimiento y sedimentos recolectados por tratamiento, en 0,25 m².

Tratamiento	Velocidad de Infiltración	Tasa de Escurrimiento	Masa sedimento recolectado
	-----mm h ⁻¹ -----	-----g-----	
T ₁	37,00 ± 0,16	0,30 ± 0,16	0,32 ± 0,08
T ₂	37,18 ± 0,05	0,12 ± 0,04	0,18 ± 0,03

Intervalo de confianza al 95%.

La V.I. promedio fue significativamente mayor en el T₂, coincidiendo con lo informado por Baumhardt y Lascano (1996) para camellones en un Mollisol de Texas. Estos autores atribuyen estos resultados directamente al porcentaje de suelo cubierto, considerando que los residuos interceptan el impacto de la gota, lo que se traduce en una compactación y sellado superficial del suelo menor que en un suelo desnudo.

Al igual que lo informado por numerosos autores (Unger, 1992; Shiono *et al.*, 2001; Wilson *et al.*, 2004; Gilley *et al.*, 1986) la masa de sedimentos recolectada fue significativamente superior en el tratamiento con suelo desnudo (T₁), que perdió aproximadamente el doble que el tratamiento cubierto con rastrojos de trigo (T₂).

Es importante destacar que el tamaño pequeño de parcela utilizado en este estudio (fracción de un camellón) provee información sólo acerca de los procesos erosivos relacionados con la precipitación en esa área, y no deben ser extrapolados a áreas mayores. De hecho, los valores de pérdida de suelo, producción de sedimentos y escorrentía obtenidos poseen un carácter sólo comparativo entre los tratamientos. Para la totalidad de un camellón, la dinámica de la erosión presentará características distintas, como consecuencia de una capacidad de transporte acumulada del flujo superficial.

Coeficiente de dispersión de arcilla

Después de aplicada la precipitación, en la superficie del suelo se detectó un aumento en la cantidad de arcilla dispersa en agua (MS_{2h}). Este incremento se relaciona directamente con el impacto de la gota de lluvia, lo cual explica por qué se observaron los valores máximos de MS_{2h} en el tratamiento con suelo desnudo.

La metodología empleada para evaluar cambios en la erodabilidad del suelo, utilizando como indicador el coeficiente de dispersión de arcilla (CD), no detectó diferencias estadísticamente significativas entre T₁ y T₂, sometidos ambos a la misma intensidad de precipitación. Adicionalmente, ninguno de los dos tratamientos superó el umbral de CD (25%) indicado por González (1990), por cuanto el suelo empleado no presentó una susceptibilidad alta a la erosión antes o después de la precipitación (Cuadro 3).

Cuadro 3. Efectos de la lluvia y la cobertura del suelo en el coeficiente de dispersión de arcilla y la textura del suelo.

T	CD _i	CD _f	A _i	A _f	L _i	L _f	a _i	a _f
	-----%-----							
T₁	12,5 ± 0,05	17,3 ± 0,05	20,6 ± 0,02	21,0 ± <0,01	34,8 ± 0,01	35,5 ± <0,01	44,5 ± 0,02	43,5 ± 0,01
T₂	12,2 ± 0,07	14,8 ± 0,03	20,8 ± 0,04	21,5 ± 0,02	33,6 ± 0,09	36,1 ± 0,02	45,3 ± 0,07	42,2 ± 0,06

T: tratamiento; CD: coeficiente de dispersión de arcilla; A: arcilla; L: limo; a: arena; i: inicial; f: final. Intervalo de confianza al 95%.

El aumento en la MS_{2h} observado se atribuyó a que antes de la precipitación una fracción de la arcilla poseía un grado mayor de agregación, la que posteriormente por el impacto de la gota de lluvia pasaría a formar parte de la arcilla en suspensión. Por otra parte, si se considera que el escurrimiento superficial realiza una remoción selectiva de partículas, es probable que parte de la MS_{2h} haya sido transportada en el flujo superficial. En este sentido, antes que el flujo precanalizado o canalizado se alcance, el impacto de las gotas es la causa más importante de desprendimiento de suelo, particularmente en regiones en que las lluvias no generan escurrimientos (Lal y Elliot, 1994). Resultados semejantes han sido informados por Stern *et al.* (1991) con un método y condiciones muy similares a las de este estudio, donde se detecta un aumento de la fracción arcilla medida en el material erodado. Esto último explicaría por qué la variación del coeficiente de dispersión de arcilla (CD) entre tratamientos no fue significativa, ya que la relación entre la arcilla dispersa en agua y la obtenida mediante el hidrómetro se mantiene a pesar de haber aumentado la dispersión en el suelo.

Por lo tanto, para las condiciones de este experimento, el efecto de la precipitación habría sido el mismo para cada nivel de cubrimiento superficial. No obstante, el coeficiente de dispersión de arcilla post-lluvia (CD_f) fue significativamente superior al obtenido previo a la precipitación (CD_i) dentro de cada tratamiento, reflejando efectivamente la alteración de la superficie del suelo. De esta manera el comportamiento del CD obedece a distintos factores en cada tratamiento. Es decir, en el T₁ la remoción selectiva de partículas sería la principal responsable de la variación del CD, mientras que en el T₂ la cobertura superficial del suelo tendría una mayor influencia.

Si bien, la erosión hídrica del suelo está relacionada con la intensidad de precipitación y la cobertura del suelo, la ponderación de cada factor es distinta. Al respecto, Nearing *et al.* (2005), señalan que los cambios más significativos en cuanto a tasas erosión y escurrimiento superficial, se observan al comparar distintas intensidades de precipitación. Por esta razón, al mantenerse fija la intensidad de precipitación, la variación de los parámetros medidos en este estudio tiende a ser similar entre tratamientos.

Ecuaciones explicativas

Para estas ecuaciones, obtenidas con stepwise, se consideró como variable dependiente el CD_i y aquellos finales post-lluvia simulada, para cada tratamiento (T_1-CD_f y T_2-CD_f). Como variables independientes se incluyeron a los separados texturales y la MS_{2h} , cuantificados antes y después de la precipitación, la densidad aparente inicial del camellón, la masa de sedimentos recolectada y el volumen de escurrimiento superficial obtenido en cada tratamiento (Cuadro 4). Los parámetros CD_i , $(MS_{2h})_i$ y A_i indican que los datos considerados para la regresión corresponden a las parcelas del T_1 y T_2 en conjunto.

Cuadro 4. Ecuaciones explicativas del coeficiente de dispersión de arcilla en camellones

Funciones	$R^2_{ajustado}$
$CD_i = 11,19 + 391,02 \cdot (MS_{2h})_i - 0,53 \cdot A_i$	0,99
$T_1-CD_f = 22,23 + 378,07 \cdot (MS_{2h})_f - 0,97 \cdot A_f + 0,03 \cdot L_f - 2,75 \cdot Da$	1,00
$T_2-CD_f = 9,66 + 374,79 \cdot (MS_{2h})_f - 0,44 \cdot A_f$	1,00

CD: coeficiente de dispersión de arcilla; **T:** tratamiento; **1:** suelo desnudo; **2:** suelo cubierto; MS_{2h} : masa de sedimentos final en la suspensión; **A:** arcilla; **L:** limo; **Da:** densidad aparente del camellón; **i:** inicial; **f:** final.

En las tres ecuaciones se observa que el CD se correlaciona en forma negativa con el porcentaje de arcilla en todas las mediciones. Al respecto, Igwe (2003) y Sakurai *et al.* (2004) encontraron correlaciones negativas entre índices de dispersión y el contenido total de arcilla para distintos suelos asociados a un riesgo potencial de erosión. El contenido mayor de arcilla se asocia directamente a una mayor estabilidad del suelo frente a la erosión, debido a la tendencia de esta partícula a la cohesión (Hillel, 1982).

Otro parámetro común, con un coeficiente positivo en todas las ecuaciones, es la masa de sedimento final obtenida al término de la suspensión (MS_{2h}). Su cuantificación se relaciona en forma directa con el desprendimiento de partículas por el impacto de la gota de lluvia y, a la vez, refleja las características de la capacidad de transporte del flujo superficial apreciado en cada tratamiento. Ambos procesos identifican la erosión en camellones en su totalidad, ya que en los taludes predomina el desprendimiento y arrastre de partículas debido al escurrimiento, mientras que en la parte superior -más plana- el impacto de la gota cobra una relevancia mayor (Sheridan *et al.*, 2000).

Después de la precipitación simulada, la regresión para el T_1-CD_f define como variables independientes adicionales el contenido de limo (L) y la densidad aparente (Da). En el T_1 (suelo desnudo) la fracción limo en la superficie del suelo es alterada por el efecto dispersivo de la gota de lluvia, lo que ocurre en menor magnitud al presentarse una barrera que disipe la energía cinética de las gotas (T_2). Por otra parte, la correlación negativa entre el T_1-CD_f y la Da se justifica por la porosidad del camellón. Mientras menor sea la Da, la capacidad de transporte del escurrimiento superficial se reduce por la mayor infiltración, con lo cual las partículas dispersas son transportadas en menor cantidad siendo detectadas por el análisis físico.

La incorporación de distintas variables independientes en cada ecuación se relaciona con la condición en que el suelo fue evaluado. Al respecto, Sheridan *et al.*, (2000) señalan que existen dificultades en predecir la erodabilidad de un suelo bajo distintas condiciones a partir del mismo conjunto de propiedades. De esta forma, debido a la naturaleza específica de los procesos erosivos, una ecuación para predecir erodabilidad puede no necesariamente ajustarse al variar las condiciones en que ocurre la erosión. En este caso, la cobertura superficial actúa como una fuente de variación que influye en la selección de propiedades explicativas utilizadas por la regresión paso a paso.

Con el objetivo de encontrar una relación que pueda ser utilizada en forma práctica en la predicción del CD, que incluya sólo variables iniciales del suelo (A_i , L_i , a_i y D_a) se obtuvo:

$$CD_i = 23,38 - 0,89 \cdot A_i + 0,17 \cdot a_i \quad R^2_{\text{ajustado}}: 0,73 \quad [\text{ec. 3}]$$

En esta función, nuevamente, el contenido de arcilla aparece con un coeficiente negativo. Por el contrario, la arena aumentaría la susceptibilidad a la erosión con un efecto diluyente sobre las propiedades de cohesión de la arcilla; esto es, las variaciones de cada parámetro derivan en efectos opuestos para el CD.

La relación entre el contenido de arcilla y de arena es posible graficarla (Figura 3) en el triángulo de clases texturales utilizado por el USDA (Soil Survey Staff, 1993).

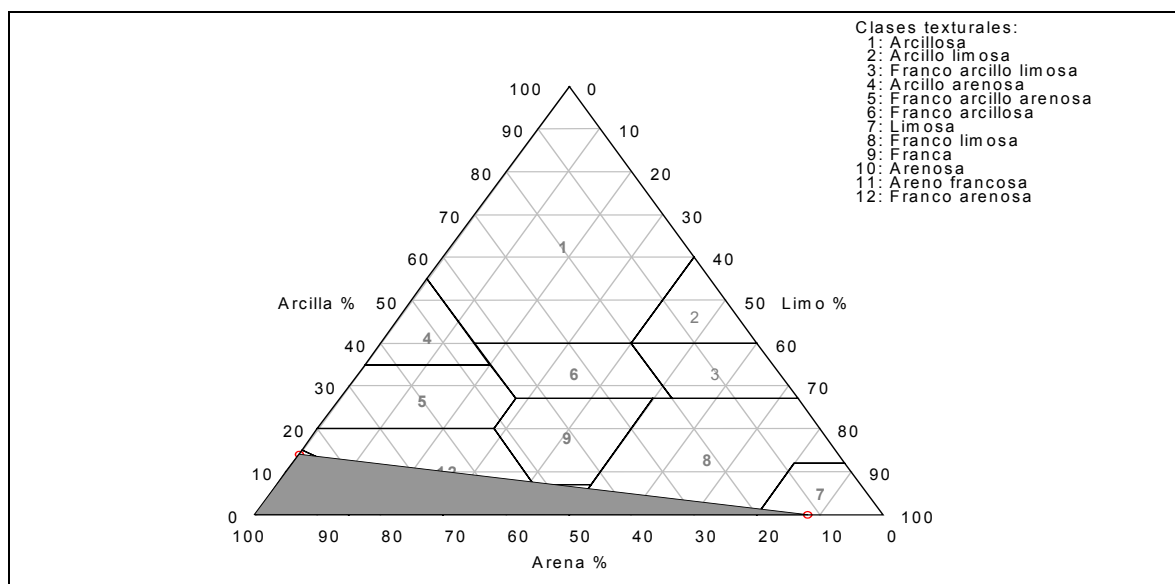


Figura 3. Triángulo textural triaxial (USDA) y zona crítica definida por ecuación 4.

El límite superior del área gris representa todas las combinaciones de separados texturales que, bajo las condiciones de este estudio, poseen un CD igual al 25% definido por González (1990). Bajo este límite se encuentran los valores mayores de CD y, por

consiguiente, los horizontes que presenten estas combinaciones serán altamente susceptibles a la erosión por efecto de la lluvia, considerando que el análisis no seleccionó a la Da como expresión de la agregación.

CONCLUSIONES

El cubrimiento del suelo influye significativamente en la disminución de la pérdida de suelo del T₂ (suelo cubierto), a la vez retrasa el tiempo de inicio de escorrentía y los volúmenes totales de escurrimiento.

Mediante la determinación del coeficiente de dispersión de arcilla (CD) es posible caracterizar la condición del suelo, previo a un evento erosivo. Por consiguiente, se puede evaluar el efecto de distintos sistemas de manejo en cuanto a la erodabilidad del suelo. Sin embargo, debido a la dinámica de la erosión hídrica, es factible que la variación del CD no muestre cambios significativos en la erodabilidad.

La masa del sedimento contenido en la suspensión después de dos horas (MS_{2h}) experimenta variaciones significativas frente a la precipitación simulada. La variación observada en el tratamiento con suelo desnudo fue mayor que en el tratamiento con 40% de cubrimiento. La cuantificación en forma directa de las partículas dispersas en la superficie del suelo refleja el comportamiento del suelo frente a la erosión hídrica.

Para una caracterización adicional del proceso erosivo, se sugiere identificar el tamaño y proporción de partículas que componen el sedimento transportado en el escurrimiento superficial, e incorporar distintos niveles de intensidad de precipitación.

BIBLIOGRAFÍA

BAUMHARDT, R. and LASCANO, R. 1996. Rain infiltration as affected by wheat residue amount and distribution in ridged tillage. *Soil Science Society of American Journal* 60:1.908-1.913.

BLAKE, G. R. and HARTGE, K. H. 1986a. Particle density. pp: 377 - 382. *In: Klute, A. (ed.). Methods of soil analysis. 2nd edition. Agronomy Monograph N° 9. Madison, Wisconsin, USA. 1.188 p.*

BLAKE, G. R. and HARTGE, K. H. 1986b. Bulk density. pp: 363 - 375. *In: Klute, A. (ed.). Methods of soil analysis. 2nd edition. Agronomy Monograph N° 9. Madison, Wisconsin, USA. 1.188 p.*

BRADY, N. and WEIL, R. 1996. *The nature and properties of soils. 11th ed, Prentice Hall Inc., New Jersey, USA. 740 p.*

BRUBAKER, S., HOLZHEY, C. and BRASHER, B. 1992. Estimating the water-dispersible clay content of soils. *Soil Science Society of American Journal* 56:1227-1232.

CIREN-CHILE. 1996. Estudio agrológico de la Región Metropolitana. Centro de Información de Recursos Naturales. Publicación N° 115. Tomo 2, 464 p.

ELLIES, A. 2000. Soil erosion and its control in Chile: An overview. *Acta Geológica Hispánica* 35(34): 279-284.

FAHLÉN, A. 1997. Erosion processes and soil and water conservation in the tropics. A state of the Art review. *Ocasional paper N° 4. Enviroment and Development Studies Unit (EDSU). Sthockholm University. Sthockholm, Sweden. 84 p.*

FAO. 2000. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. *Boletín de tierras y aguas N° 8, Roma, Italia. 220 p.*

FENG, J. C. 1995. *Soil conservation handbook. China, Food Fertilizer Technology Center for the Asian and the Pacific Region. Book Series N° 11. 432 p.*

GEE, G. W. and BAUDER, J. W. 1986. Particle size analysis. pp. 383-411. *In: Klute, A. (ed.). Methods of soil analysis. 2nd edition. Agronomy Monograph N° 9. Madison, Wisconsin, USA. 1.188 p.*

GILLEY, J., FINKER, S., SPOMER, R. and MIELKE, L. 1986. Runoff and erosion as affected by corn residue. Part I. Total losses. *Transactions of the ASAE* 29(1):157-160.

- GONZÁLEZ, A. 1990. Guías de prácticas de la Maestría en Suelos y Aguas. Universidad Nacional de Colombia. Palmira, Colombia. In: *Introducción a la Ciencia del Suelo* (Jaramillo, D. Editor). Facultad de Ciencias. Escuela de Geociencias. 613 p.
- HILLEL, D. 1982. *Introduction to Soil Physics*. Academic Press. California. USA. 365 p.
- HUDSON, N. 1995. *Soil conservation*. Redwood Books. London, Great Britain. 391 p.
- IGWE, C. 2003. Erodibility of soils of the upper rainforest zone, southeastern Nigeria. *Land Degradation and Development* 14: 323-334.
- LAFLEN, J.M., AMEMIYA, M. and HINTZ, E.A. 1981. Measuring crop residue cover. *Journal of Soil and Water Conservation* 36:341-343.
- LAL, R. and ELLIOT, W. 1994. Erodibility and erosivity. pp: 181 - 208. *In: Lal, R. (ed.). Soil erosion research methods*. Soil and Water Conservation Society and St. Lucie Press. Florida, USA. 340 p.
- LANDON, J. 1984. *Tropical Soil Manual*. Booker Agriculture. International Limited. Londres. 450 p.
- MILLER, W., and BAHARUDDIN, M. 1986. Relationship of soil dispersibility to infiltration and erosion of southeastern soils. *Soil Science* 143 (4): 235-240.
- NEARING, M., LANE, L. and LOPES, V. 1994. Modeling soil erosion. pp: 127 - 156. *In: Lal, R. (ed.). Soil erosion research methods*. Soil and Water Conservation Society and St. Lucie Press. Florida, USA. 340 p.
- NEARING, M., JETTEN, V., BAFFAUT, C., CERDAN, O., COUTURIER, A., HERNANDEZ, M., LE BISSONNAIS, Y., NICHOLS, M., NUNES, J., RENSCHLER, C., SOUCHÈRE, V. and VAN OOST, K. 2005. Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. *Catena*. En imprenta.
- SADZAWKA, A., GREZ, R., MORA, L., SAAVEDRA, N., CARRASCO, M., FLORES H. y ROJAS, C. 2000. *Métodos de análisis recomendados para los suelos chilenos*. Comisión de Normalización y Acreditación, Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Disponible en: <http://www.inia.cl/~asadzawka/metodos2000-sep.pdf>. Leído el 16 de Diciembre 2003.
- SAKURAI KATSUTOSHI, KAWAZU HIWASA, KONO YASUYUKI, YANAGISAWA MASAYUKI, LE VAN TIEM, LE QUOC THANH, NITTAYA DANGTHAISONG and TRINH NGOC CHAU. 2004. Impact of agricultural practices on slope land properties of the mountainous region of northern Vietnam: A case study in Bac Ha District, Lao Cai Province. *Southeast Asian Studies* 41 (4): 503-518.

SHAXON, T., HUDSON, N., SANDERS, D., ROOSEE and MOLDENHAUER, W. 1989. Land husbandry. A frame work for soil and water conservation. Soil and Water Conservation Society. Iowa, USA. 64 p.

SHERIDAN, G., SO, H., LOCH, R. and WALKER, C. 2000. Estimation of erosion model erodibility parameters from media properties. Australian Journal Soil Research 38:256-284.

SHIONO, T., TAKAGI, A., OGURA, C. and KAMIMURA, K. 2001. Influence of cabagge on ridge erosion. pp: 329 – 332. *In*: Sustaining the global farm,10th Internacional Soil Conservation Organization (ISCO). West Lafayette, Indiana, USA. May 24 – 29, 1999. Purdue University and US DA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. West Lafayette, Indiana, USA. 459 p.

SOIL SURVEY STAFF. 1993. Soil survey manual. Soil Survey Division Staff. United Stated Department of Agriculture. Washington, Estados Unidos. USDA-Handbook N° 18. 437 p.

STERN, R., BEN-HUR, M. and SHAINBERG, I. 1991. Clay mineralogy effect on rain infiltration, seal formation and soil losses. Soil Science 152(6):455-461.

STOCKING, M. 1994. Assessing vegetative cover and management effects. pp: 211-232. *In*: Lal, R. (ed.). Soil erosion research methods. Soil and water conservation Society and St. Lucie Press. Florida, USA. 340 p.

UNGER, P. 1992. Infiltration of simulated rainfall: tillage system and crop residue effects. Soil Science Society of American Journal 56:283-289.

WILSON, G., DABNEY, S., MCGREGOR and BARKOLL, B. 2004. Tillage and residue effects on runoff and erosion dynamics. Transactions of the ASAE 47(1): 119-128.

APÉNDICE 1

Descripción de suelo

Características físicas y morfológicas del Pedón:

Profundidad

(cm)

0 – 30 A _p	Pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); franca; bloques subangulares finos medios; muy friable; moderadamente plástico, moderadamente adhesivo; poros finos y muy finos abundantes, medios comunes; raíces muy finas abundantes y finas comunes, reacción al HCl moderadamente efervescente; límite lineal claro
30 – 60 B	Sustrato aluvial con matriz presente en un 60%; pardo oscuro (10YR3/3)s, pardo a pardo oscuro (10YR4/3)h; franca; bloques subangulares medios débiles; moderadamente duro, muy firme; ligeramente plástico, moderadamente adhesivo; poros finos escasos; raíces finas escasas; reacción al HCl ligeramente efervescente; límite lineal quebrado.
60 – 80 y más C	Sustrato aluvial con matriz presente en un 20%; pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2)s, pardo a pardo oscuro (10YR4/3)h; franco arenosa gravosa; bloques subangulares finos débiles; ligeramente duro; friable; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; poros finos escasos; raíces finas escasas; reacción al HCl muy ligeramente efervescente.

Observaciones: en el horizonte B se observan clastos esféricos y discoidales de hasta 17 cm de diámetro, que aumentan en tamaño a partir de los 60 cm.