

EROSIÓN POR LABRANZA CON ARADO DE DISCO EN SUELOS VOLCÁNICOS DE LADERA EN COSTA RICA

Guy R. Mehuys^{1/}, Kevin H.D. Tiessen^{*}, Mario Villatoro^{**}, Freddy Sancho^{**}, David A. Lobb^{***}*

Palabras clave: Labranza, erosión, ladera, producción sostenible.

Keywords: Tillage, erosion, steepland, sustainable production.

Recibido: 28/04/09

Aceptado: 15/07/09

RESUMEN

Este trabajo midió el movimiento de suelo por labranza y erosión al utilizar el arado de disco, el implemento de labranza primaria más común en la región cultivada en las faldas del volcán Irazú. Los resultados revelaron que el potencial de erosión por labranza es muy alto, tanto así que los valores de erosividad de la labranza por el arado de disco fueron el doble de los reportados en implementos de labranza primaria utilizados en Europa y Norte América. Se concluyó que la reducción de erosión del suelo por labranza y agua es necesaria para mantener una producción agrícola viable a largo plazo en esta región de Costa Rica.

ABSTRACT

Tillage erosion by the disc plow on steepland volcanic soils in Costa Rica. This paper focuses on a study that measured tillage translocation and tillage erosion by the disc plow, the most common mechanized primary tillage implement used in the cultivated region of Irazú volcano slopes. Results revealed that the potential for tillage erosion on Irazú volcano is extremely high, as tillage erosivity values measured for the disc plow were twice of those reported for primary tillage implements used in Europe and North America. We believe that a reduction in both, tillage and water erosion, is necessary to reduce soil losses and maintain the long-term viability of crop production in this region of Costa Rica.

INTRODUCCIÓN

La erosión de suelos en tierras cultivadas es un problema que continua amenazando la sostenibilidad de la agricultura comercial y de subsistencia en muchas partes de Costa Rica (Sancho 1991, Vahrson 1990, Vahrson y Palacios 1993, Bertsch 2006). A pesar de la implementación de programas de conservación de suelos por décadas, las pérdidas de suelo continúan debido a los procesos erosivos. Los efectos aditivos de la erosión, en la productividad del suelo, se reflejan rápidamente en la disminución de la fertilidad del

suelo y de la producción de los cultivos; mientras que las comunidades ubicadas en las partes más bajas del terreno, sienten el impacto de la erosión del suelo en la presencia y deposición de los sedimentos provenientes de las tierras altas en riachuelos, ríos, lagos y represas construidas para generación hidroeléctrica.

La erosión de suelos es el resultado de 3 procesos: viento, agua y labranza. La labranza ha influenciado por años los procesos erosivos del agua y del viento. Estudios recientes han demostrado que la dirección del movimiento del suelo, causada por operaciones de labranza, es un

1. Autor para correspondencia. Correo electrónico: guy.mehuys@mcgill.ca

* Department of Natural Resource Sciences, McGill University, Montreal, Canadá.

** Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

*** Department of Soil Science, University of Manitoba, Winnipeg, Canadá.

proceso importante y distinto al causado por el viento y el agua (Govers et al. 1999, Van Oost et al. 2006). Como la erosión por labranza no está en función del clima, los resultados de investigación son relativamente fáciles de transferir de un país a otro. Sin embargo, la información acerca de la erosión por labranza en laderas agrícolas en producción, especialmente en América Latina, es escasa. En los Andes de Venezuela, Rymshaw et al. (1997) observaron que las operaciones de control de malezas dentro de parcelas pequeñas y de ladera, contribuyen más al movimiento de suelo y piedras que la lluvia. En el sur de Ecuador, Dercon (2001) y Dercon et al. (2007) evaluaron la intensidad erosiva de la labranza, en sistemas agrícolas de producción comunes, en la región de los Andes, incluyendo labranza con disco y sistemas impulsados por animales. En ambos países, los investigadores encontraron que la erosión por labranza fue la mayor causa de la pérdida severa e insostenible de suelo observada en el campo. Por lo tanto, se cree que la amenaza de pérdida de suelo y por ende su efecto detrimental en la productividad de los cultivos, en sistemas similares en Costa Rica, ha sido subestimada.

El objetivo principal de este trabajo fue evaluar el potencial erosivo de labranza por arado de disco, un implemento común de labranza primaria usado en el cultivo de papa y hortalizas en suelos volcánicos de ladera del volcán Irazú. Este trabajo también proveerá información del proceso de erosión por labranza, discute los factores que influyen este tipo de erosión y examina el impacto que la erosión por labranza tiene en la variación espacial de las propiedades del suelo y producción de cultivos. Finalmente, el trabajo discutirá las prácticas de manejo que pueden ser usadas para reducir o eliminar el impacto negativo de la erosión por labranza.

¿Qué es erosión por labranza?

La labranza es una parte integral de la producción de cultivos y en todas las operaciones ocurre el desplazamiento, acomodo, y la mezcla del suelo. Al desplazamiento y transporte resultante del suelo, a lo largo de los terrenos, se le

llama traslado por labranza (Govers et al. 1999). Cuando la labranza se realiza en contra de la pendiente o a favor de esta; generalmente, más suelo es movido a favor de la pendiente cuando la labranza es en el mismo sentido, que el suelo movido en contra de la pendiente (Figura 1). En laderas, este traslado del suelo es facilitado por la gravedad. Además, la labranza hacia abajo, usualmente ocurre a mayor velocidad que cuando se hace hacia arriba, lo cual empeora la situación (Lobb et al. 1999, Van Muysen et al. 2000). Si las operaciones de labranza son efectuadas en forma perpendicular a la pendiente, la erosión por labranza usualmente se reduce (Van Muysen et al. 2002). Aún así, este tipo de labranza sigue presentando movimiento de suelo hacia el pie de la pendiente (Figura 2a). En estos transectos, la erosión por labranza ocasiona un desgaste del perfil del suelo de las divisiones de las parcelas a favor de la pendiente y un acúmulo de suelo al lado, en contra de la pendiente. La erosión por labranza perpendicular a la pendiente, puede ser incluso más severa que aquella a favor de la pendiente (Lindstrom et al. 1992), si se usa un arado y el volcado es a favor de la pendiente (Figuras 2b y 3).

Estos patrones característicos de la pérdida de suelo, debido a erosión por labranza, son diferentes a los producidos por erosión hídrica. La erosión hídrica causa un máximo de pérdida de suelo en las áreas medias y bajas de la pendiente, así como acumulación de suelo al pie de las pendientes y en las depresiones. La erosión por labranza causa principalmente pérdida de suelo desde la parte superior de la pendiente y acúmulo de suelo al pie de esta. Evidencia en el campo de erosión hídrica, son los canales después de una lluvia fuerte. La erosión por labranza, en cambio, no es el resultado de un solo evento severo, pero ocurre constantemente en el tiempo. Además, este proceso de labranza no acomoda el material, como si lo hace la erosión hídrica separando partículas finas y moviéndolas a otros puntos. Por lo tanto, el suelo erodado por labranza puede ser devuelto a las áreas erodadas de la pendiente, virtualmente sin cambios. La erosión por labranza y la erosión hídrica pueden actuar conjuntamente.

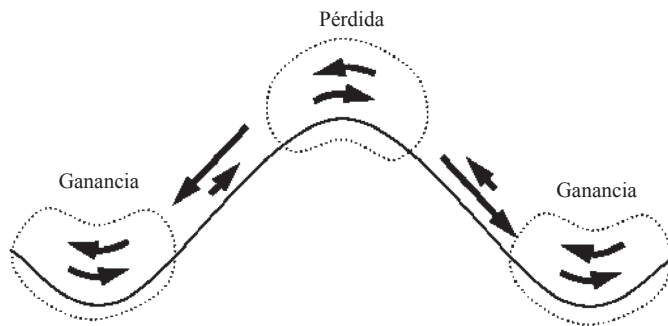


Fig. 1. Ejemplo de erosión por labranza en un transecto de colina donde la labranza a favor y en contra de la pendiente causa pérdida de suelo en la cima y acumulación de este en la base de las mismas. La variabilidad del movimiento del suelo es proporcional al tamaño de las flechas. Figura adaptada del grupo de trabajo en traslado y erosión por labranza de la Universidad de Manitoba, Winnipeg, Canadá.

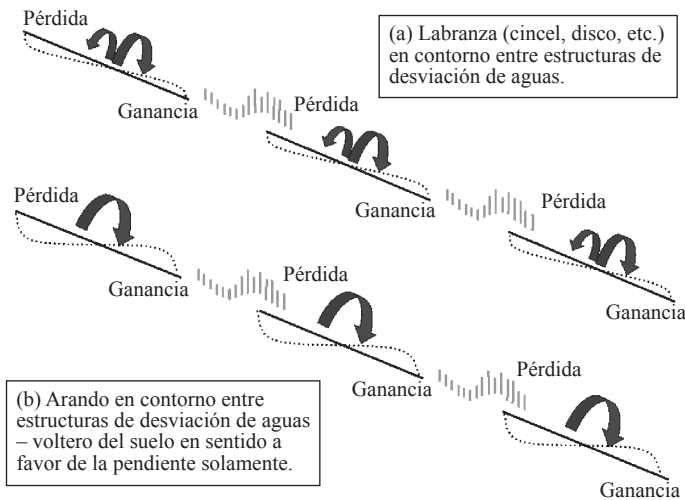


Fig. 2. Ejemplo de erosión por labranza en un campo seccionado por bordes de parcelas (i.e., terrazas de desvíos de aguas, franjas verdes, líneas de división, etc.). La erosión por labranza causa un recorte del perfil del borde de campo hacia el lado a favor de la pendiente y en un enterramiento hacia el lado superior del borde de campo: (a) labranza en contorno usando un implemento de volteo en 2 direcciones y (b) arando en el contorno con un implemento de volteo de solo 1 dirección y a favor de la pendiente solamente. Las flechas muestran la variabilidad en el movimiento del suelo. Figura adaptada del grupo de trabajo en traslado y erosión por labranza de la Universidad de Manitoba, Winnipeg, Canadá.

La mayor parte del suelo removido por labranza es trasladado a 15-30 cm, aunque parte de este puede ser trasladado desde 2 hasta 24 m, dependiendo del implemento y la dirección de la labranza. Como la erosión por labranza mueve el suelo hasta las partes bajas de la pendiente, donde

la erosión hídrica es más severa, la erosión por labranza es en realidad un mecanismo importante para la erosión hídrica y puede aumentar el potencial de contaminación de aguas dentro de un paisaje agrícola.



Fig. 3. Una terraza progresiva en una región productora de papa, en las faldas del volcán Irazú en Costa Rica. Nótese la diferencia de nivel (entre 1,5 y 2,0 m después de 40 años de cultivo) entre parcelas a consecuencia de la erosión por labranza.

Factores que influyen la erosión por labranza

Todo el proceso de erosión por labranza está explicado en función de la erodabilidad de un paisaje y la erosividad del sistema de labranza usado en ese paisaje (Lobb y Kachanoski 1999). La erodabilidad de un paisaje, es la susceptibilidad de este a ser erodado por labranza. Está influenciado, principalmente, por la topografía (i.e. grado de inclinación y tipo de pendiente) y las propiedades físicas del suelo. Por ejemplo, paisajes topográficamente complejos (i.e. cortos, empinados, de diferentes inclinaciones) son muy susceptibles a la erosión por labranza. La erosividad de la labranza es la habilidad de la operación de labranza (o la secuencia de operaciones) para trasladar y erodar el suelo. Esto depende del diseño y tipo de implemento, profundidad y velocidad de la operación (la profundidad determina cuánto suelo es movido, mientras que velocidad afecta que tan largo se moverá el suelo), el número de pasadas, la dirección y patrón de la labranza. Por lo tanto, implementos de labranza muy grandes, operados a excesiva profundidad y velocidad o en patrones erosivos (e.g. a favor de la pendiente), son muy erosivos, lo que implica que entre más

pasadas mayor erosión. Como resultado de estos 2 factores, la degradación del suelo, debida a erosión por labranza, se espera que sea de mucha consideración en regiones donde se cultiva hortalizas y papa intensivamente, esto unido a paisajes de alta erodabilidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los experimentos de labranza fueron realizados en 2 lotes, sin terracear, cerca de Pacayas (9° 55' N, 83° 49' O y 1735 msnm), en el sureste de las faldas del volcán Irazú. Ambos sitios fueron cultivados continuamente con hortalizas (papas, zanahorias, coliflor, etc.). Los sitios tienen pendientes que oscilan de 2-35%. Los suelos de esta región son Andisoles típicos, de alta fertilidad, baja densidad aparente y buen drenaje (Alvarado et al. 2001). Los 2 sitios fueron seleccionados porque el suelo, el paisaje, los implementos de labranza y las prácticas de producción agrícola son típicas de esta región.

En los sitios con pendientes <30%, los productores de las faldas del volcán Irazú comúnmente contratan un tractor y usan como herramienta de labranza primaria el arado de disco, con labranza típicamente en dirección de la pendiente y con el único cuidado de la inclinación de la pendiente (e.g. riesgo de volcamiento, tractores de baja potencia, desgaste del implemento, etc.). Los cultivos son plantados en contorno (perpendicular a la pendiente). Las operaciones de labranza secundaria, para preparar el lecho para las semillas, son usualmente realizadas por un rotavator (tanto en dirección de la pendiente como transversal a esta). Todas las operaciones adicionales son llevadas a cabo manualmente. En este estudio, solamente fueron medidos el traslado por labranza y la erosión por el arado de disco.

El traslado de suelo por labranza fue medido utilizando los métodos establecidos por LOBB et al. (2001) y LOBB (2002). Se determinó una unidad de suelo la cual consiste en una porción de la zona por donde el arado pasaría. En esta unidad de suelo se enterró un indicador

y se colocó perpendicular a la dirección de la labranza. Después de la labranza, se determinó la redistribución del indicador en el suelo a lo largo de la pasada de la labranza. Este dato fue usado para producir una curva de sumatoria y así poder calcular el movimiento promedio del suelo en la dirección de la labranza. A partir de esta curva de sumatoria se puede calcular: la distancia de traslado media (T_p), el coeficiente del error experimental, y la variabilidad de traslado (ϵ), la media de la distancia de traslado de la capa arable (T_L), y más importante, la masa del suelo trasladado (T_M) en la dirección de labranza.

Las operaciones de labranza fueron realizadas en dirección de la pendiente, en 2 sitios que recientemente fueron cosechados manualmente de zanahoria y papa, respectivamente. En vista de que las operaciones de labranza mecanizadas en esta región, generalmente, ocurren a favor a la pendiente, las parcelas a favor a la pendiente duplicaron aquellas en contra de la pendiente.

Para la precisión en las mediciones de movimiento de suelo por labranza, el largo de cada unidad de suelo fue de 20 cm, un largo considerado mínimo para el flujo irregular del suelo durante las operaciones de labranza (Lobb 2002). El ancho y el alto de las unidades de suelo dependieron del ancho del implemento de labranza (i.e. la distancia entre 2 herramientas adyacentes) y la profundidad de labranza. Las cajas (80 cm de ancho x 20 cm de largo y 50 cm de alto) a ser ubicadas en cada unidad de suelo y las bases donde se colocaron las cajas fueron preparadas previamente y construidas con lámina de plywood. Se usó como indicador de las operaciones de labranza piedras tipo grava blanca (6-13 mm de diámetro). Como la densidad aparente del suelo se conocería hasta después de la labranza, la cantidad de indicador usada por caja fue calculada asumiendo una densidad aparente de 1000 kg.m^{-3} (Alvarado et al. 2001) y usando un 5% de masa de indicador por cada unidad experimental.

Todas las unidades de suelo fueron colocadas durante la época seca en el 2007. Para asegurar que las bases no fuesen golpeadas por el implemento de labranza, fueron colocadas a

40 cm de profundidad, 10 cm más hondo que la profundidad máxima estimada de labranza (≈ 30 cm). Los sitios para enterrar las cajas fueron excavados y las bases para las cajas fueron colocadas de tal forma que coincidieran con la inclinación del terreno. La profundidad a la que se colocaron las bases fue de ± 5 mm una de otra. Una vez que la base fue colocada en el hueco, se acomodó la caja dentro de este y todo el suelo excavado fue puesto nuevamente en la caja y alrededor de esta. Además, el suelo fue comprimido a su densidad original. El suelo dentro de la caja fue luego re-excavado y puesto en cubetas. Una cantidad proporcional de indicadores fue mezclada vigorosamente con el suelo de las cubetas. También una cantidad de masa de suelo aproximadamente igual a la masa del indicador incorporado fue removida. La mezcla de suelo e indicadores fue colocada nuevamente en las cajas, y el suelo fue nuevamente re-empacado a su densidad inicial. Finalmente, la caja fue removida, dejando la base en el suelo como punto de referencia para muestrear después de las operaciones de labranza. En ambos sitios, las operaciones de labranza se realizaron al día siguiente de que se estableció la unidad de suelo.

Las unidades de suelo fueron ubicadas en las áreas que mejor caracterizaban la variabilidad topográfica dentro de los 2 sitios, asegurando que un amplio ámbito de posiciones (i.e. cresta, parte trasera de la pendiente, pie de pendiente, etc.) en el paisaje fueran incluidas. Con una estación total (Sokkia DT610) se realizó un levantamiento topográfico de donde se ubicaron las unidades de suelo, para calcular la gradiente de la pendiente (θ) en la localización de cada unidad de suelo. El grado de pendiente se considera negativo cuando la labranza se realiza en contra de la pendiente y positivo cuando es a favor de esta. Los ámbitos de los θ caracterizan, en parte, la erodabilidad del paisaje (Lobb y Kachanoski 1999). La velocidad de la labranza (S_T) y su profundidad (D_T) fueron establecidas por el tractorista y monitoreadas para cada operación de labranza. La velocidad del implemento fue medida entre marcas previamente establecidas 3 m antes y 3 m después de cada

unidad de suelo. La profundidad de la labranza fue medida manualmente en cada unidad de suelo. Todas las operaciones de labranza mecanizada fueron realizadas con el mismo tractor (Explorer SAME 80) y el mismo arado de disco con 3 discos de 60 cm de diámetro (Figura 4). Las muestras de suelo, para medir densidad aparente del suelo (ρ_b), fueron tomadas donde se ubicó cada unidad de suelo, inmediatamente después de la labranza (las ρ_b en los 2 sitios no fueron diferentes significativamente y promediaron 656 kg.m^{-3}).

Después de la labranza, las unidades de suelo fueron muestreadas inmediatamente para determinar la distribución de los indicadores y separar el movimiento de suelo causado por la labranza de otros procesos (en particular erosión del suelo). El borde de la base fue localizado y usado como posición de referencia de la unidad de suelo. Durante la labranza hubo mezcla lateral del suelo; por lo tanto, el ancho de muestreo de las unidades de suelo, se extendió en ambos lados en aproximadamente 1 m por lo que hay que tomar en cuenta esta mezcla. Un marco de muestreo de $2,5 \times 2 \text{ m}$ fue construido para facilitar el muestreo. El suelo fue recolectado y tamizado para separar los indicadores, los cuales fueron encontrados desde de la base hasta 2-8 m, dependiendo de la dirección de la labranza. Lobb (2000) recomienda que las láminas de muestra de suelo, no



Fig. 4. Arado de disco usado en las faldas del volcán Irazú, Costa Rica.

sean más de 1,5 del largo de la unidad de suelo, también sugiere que en tanto haya suficientes datos para crear una curva acumulativa precisa (≈ 10 datos), la precisión de la curva acumulativa no se verá afectada por incrementos de muestreo largos. Así las cosas, fueron tomadas muestras en el primer metro en incrementos de 10 cm, en el segundo metro en incrementos de 20 cm, y más allá de los 2 m en incrementos de 40 cm. Las distancias finales de las muestras fueron determinadas como el punto donde no había más indicadores. También, en el extremo se tomó 2 láminas de muestra (típicamente de 40-80 cm). Después del muestreo, los indicadores fueron lavados para remover el suelo, secados al aire y pesados para determinar la cantidad de marcadores dentro de cada muestra y el porcentaje total recuperado de estos (RR).

Una descripción detallada de los cálculos usados para determinar T_p , ϵ , T_L , y T_M son reportados por Tiessen et al. (2007a). Aquí, la masa de suelo trasladado, T_M , es expresada como una función de regresión lineal de gradiente de la pendiente (Eq. 1) en la dirección de la labranza:

$$T_M = \alpha + \beta\theta \quad (1)$$

donde α representa el traslado por labranza no afectada por la gradiente de la pendiente (i.e. el traslado que ocurre a nivel del suelo) ($\text{kg.m}^{-1}.\text{pasada}^{-1}$); β es el coeficiente para la gradiente de la pendiente, o el cambio en traslado de la labranza debido a cambios en la gradiente de la pendiente, y es comúnmente llamado como el coeficiente de la eficiencia de transporte ($\text{kg.m}^{-1}.\%^{-1}.\text{pasada}^{-1}$); y θ es la gradiente de la pendiente (%). β es un indicador de la erosividad de operación de labranza dada, mientras α indica la dispersividad del suelo trasladado después de la labranza. Ambos pueden ser usados para comparar los resultados de experimentos de traslado por labranza.

En total, se muestrearon 8 unidades de suelo a favor de la pendiente y 4 en contra de la pendiente. Sin embargo, dos de las unidades de suelo (una a favor de la pendiente y otra en contra) se dañaron durante las operaciones de labranza y fueron excluidas de los análisis.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La proporción de los marcadores recuperados, después de las operaciones de labranza, fue alta para todas las unidades de suelo, con un promedio de 94,3% (Cuadro 1), el cual es similar a los valores reportados en estudios previos, usando materiales y métodos similares, en Canadá (Li et al. 2007, Tiessen et al. 2007a, c). Además, el promedio, el cual abarca el error experimental y la variabilidad en el desplazamiento a lo largo de todas las unidades de suelo de labranza fue bajo con 6,2%.

En condiciones de operación normales en el campo, se observó que S_T y D_T fueron muy variables a través del transecto con el arado de disco, ya que debido a los cambios en las condiciones del suelo y de la topografía, los tractoristas frecuentemente tienen que hacer ajustes en la operación del tractor. Comparado con la pasada a favor de la pendiente, el valor de S_T en contra de la pendiente del arado de disco, fue reducido en un 32%; mientras que el valor D_T se redujo en un 6%. Esto porque el tractorista tuvo que reducir la relación de caja en las partes más empinadas del transecto, con lo cual el tractor junto con el implemento se detenían por un momento cuando subían en la pendiente. Estos resultados son consistentes con los obtenidos por Lobb et al. (1999) y Tiessen et al. (2007b). En tanto que el valor de S_T para el arado de disco fue similar al de estudios previos, el valor típico de D_T usado en

producción de vegetales en las faldas del volcán Irazú fue alto. Esto es importante, pues estudios previos han identificado a S_T y D_T (y su variabilidad a través del transecto) como 2 de los factores más importantes que afectan la erosividad de la labranza (Van Oost et al. 2006, Tiessen et al. 2007b, c).

En general, está claro que el arado de disco tiene el potencial de mover cantidades significativas de suelo a grandes distancias y es un implemento muy erosivo. Después de una sola pasada de labranza, el arado de disco en promedio mueve suelo a distancias máximas de desplazamiento ($T_{L(MAX)}$) que exceden 4,5 m (Cuadro 1), con un $T_{L(MAX)}$ máximo de 7,6 m, esto fue observado en una unidad de suelo cultivada a favor de la pendiente (datos no presentados). Estas distancias son similares a las reportadas por Tiessen et al. (2007a), pero son considerablemente mayores a las reportadas por experimentos de labranza previos realizados en otras partes. Estos resultados refuerzan la sugerencia de Tiessen et al. (2007a) de que la técnica de rastreo de unidades de suelo, junto con un muestreo extensivo que garantice una alta tasa de recuperación del indicador, es la principal razón de por qué las distancias máximas de desplazamiento son de 2-3 veces más altas que las reportadas previamente. En estudios futuros debe tenerse cuidado para asegurar que la toma de muestras se hace hasta distancias que consideren todos los indicadores, para así no subestimar el potencial erosivo de la labranza con

Cuadro 1. Datos de traslado de suelo causado por el arado de disco en las faldas del Volcán Irazú.

Dirección de la labranza	Número de unidades de suelo	S_T (km.h ⁻¹)	D_T (m)	$T_{L(MAX)}$ (m)	T_L (m)	T_M (kg.m ⁻¹)	RR (%)	ϵ (%)
Contra pendiente	3	4,4	0,28	3,6	0,29	56,4	94,8	10,4
A favor de la pendiente	7	6,4	0,30	5,3	0,64	123,5	94,1	4,5
Promedio		5,8	0,29	4,8	0,53	103,4	94,3	6,2
D.E.		1,3	0,02	1,7	0,24	45,6	0,7	5,8

S_T =velocidad del tractor; D_T =profundidad de labranza; $T_{L(MAX)}$ =distancia máxima de traslado; T_L =distancia de traslado promedio de la capa labrada; T_M =masa de suelo trasladado; RR=proporción de indicador recuperado; ϵ =error experimental.

cualquier implemento. Más aun, el movimiento de suelo a favor de la pendiente, para T_L y T_M , fue aproximadamente el doble de lo obtenido cuando el movimiento fue en contra de la pendiente (se debe recordar que es el movimiento neto de suelo lo que dirige la erosión por labranza). De hecho, el movimiento neto de suelo causado por el arado de disco ($67,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$) es más alto que el reportado para cualquiera de los implementos de labranza primaria y secundaria, comúnmente usados en producción de papa en el Atlántico de Canadá (Tiessen et al. 2007a). Como la mayoría de las operaciones de labranza, en esta región, son efectuadas a favor de la pendiente solamente, el potencial de erosión por labranza es mucho mayor. Si la labranza se efectúa solamente a favor de la pendiente, el movimiento neto de suelo causado por el arado de disco es de $123,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$, que es de 3-10 veces mayor que los valores reportados

por Tiessen et al. (2007a), donde las operaciones de labranza, generalmente, ocurren en direcciones opuestas. La tasa de pérdida de suelo correspondiente, puede ser calculada dividiendo este valor por el largo de la pendiente (convertirlo a $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y es equivalente a aproximadamente $250 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{pasada}^{-1}$ desde los primeros 5 m de la cima, hacia la parte basal de la pendiente.

El traslado de suelo por labranza con arado de disco, fue muy variable a través del transecto, y no siempre se obtuvo mediciones en posiciones de la pendiente donde las gradientes fueron máximas. No obstante, se observó una relación significativa entre la masa de suelo trasladado y la gradiente de la pendiente para el cultivo, tanto a favor como en contra de esta (Figura 5a), así como solo para el cultivo a favor de la pendiente (Figura 5b). Se determinó relaciones similares entre T_L y θ (a favor y contra la

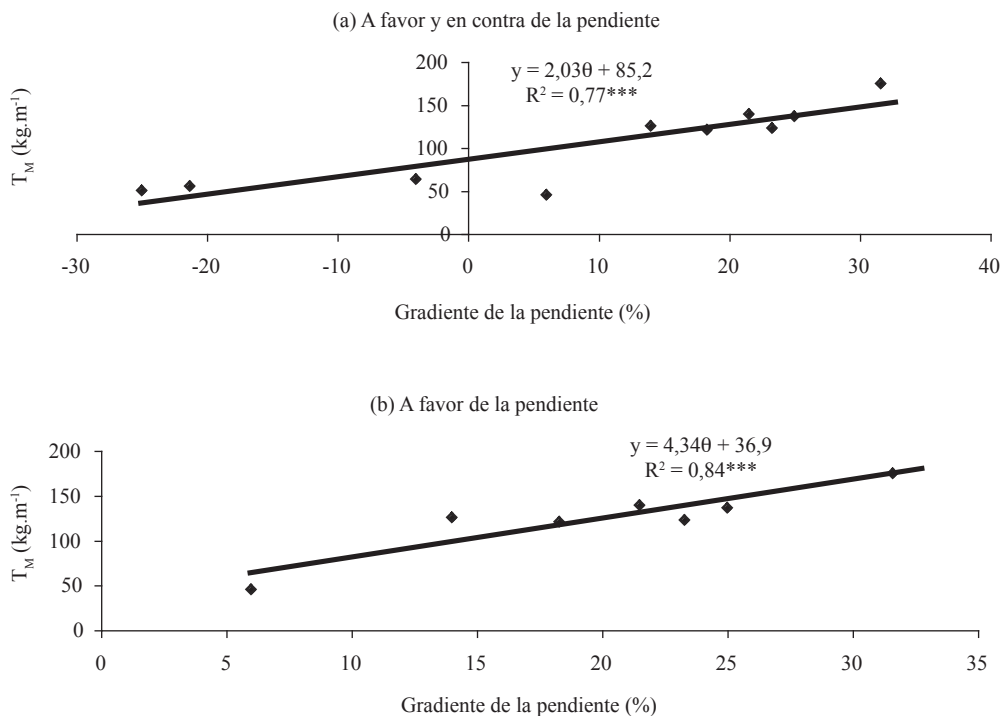


Fig. 5. Regresiones lineales entre la masa de suelo trasladado T_M y la gradiente de la pendiente para un arado de disco: a) preparación de suelo a favor y en contra de la pendiente; b) a favor de la pendiente solamente (**denota significancia a 1%).

pendiente: $T_L=0,44+0,011\theta$, $R^2=0,76^{**}$ ($p\leq 0,01$); a favor de la pendiente solamente: $T_L=0,19+0,023\theta$, $R^2=0,82^{**}$ ($p\leq 0,01$ datos no presentados). Estos resultados concuerdan con los de otras investigaciones, las cuales reportan que la erosión por labranza puede ser explicada en gran parte por la gradiente de la pendiente (Govers et al. 1999). Para poner los valores de erosividad del arado de disco en perspectiva, el valor β (i.e. el potencial de erosión por labranza) para el cultivo a favor y en contra de la pendiente ($2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\%^{-1}$) es similar al reportado por Tiessen et al. (2007b) para un arado mucho más grande ($1,8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\%^{-1}$) y cincel ($1,9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\%^{-1}$) usados en Canadá. Sin embargo, cuando el cultivo se realiza solo a favor de la pendiente, el valor β ($4,3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\%^{-1}$) es más del doble que el que se da cuando el cultivo es a favor y en contra de la pendiente (Figura 5) y es considerablemente mayor a cualquier otro valor reportado actualmente en la literatura, para implementos de labranza primaria. Los valores masivos de erosividad de la labranza, medidos para el arado de disco en combinación con el hecho de que 2 o 3 cultivos son usualmente sembrados por año, alternados con vegetales cultivados intensivamente, pueden explicar por qué es tan grande la pérdida de suelo que ocurre en posiciones de transectos convexos y, quizás, más importante, en las faldas del volcán Irazú, hacia abajo de los límites de los lotes. De la misma forma, Dercon (2001) sugirió que en condiciones particulares de sistemas de labranza mecanizada usados en Ecuador (i.e. solo a favor de la pendiente, unido a una competencia fuerte entre tractoristas por trabajo adicional, etc.) resultaron en tasas de erosión por labranza considerablemente más altas que las reportadas previamente para implementos de labranza primaria en Europa y Norte América. Estos resultados indican cómo una combinación de transectos de alta erodabilidad (altas pendientes, suelos con baja densidad aparente) y una alta erosividad de la labranza (prácticas de cultivo erosivas tales como labranza profunda y cultivo a favor de la pendiente solamente) se han combinado para aumentar en gran medida el riesgo de erosión por labranza en las faldas del volcán Irazú.

Una situación similar, a la descrita para la labranza mecanizada, puede darse tanto para labranza manual como animal. Con la labranza manual, el suelo es empujado a favor de la pendiente, igual sucede con la labranza por empuje animal, pues aunque las operaciones son efectuadas en contorno, el suelo usualmente es tirado a favor de la pendiente. Si se considera que las labranzas manual y animal son realizadas en pendientes mayores al 35%, la erosividad causada por estas operaciones de campo, se compara a la que ocurre con labranzas mecanizadas. Sin embargo, se necesita más investigación para cuantificar el traslado y la erosión del suelo en labranzas primarias y secundarias, y operaciones comunes de empuje animal y manual en producción agrícola en Costa Rica.

El movimiento del suelo por labranza rara vez ha sido considerado como un problema serio, esto debido a que a diferencia de la erosión hídrica y eólica, la erosión por labranza es inconspicua en el campo y ocurre lentamente a lo largo del tiempo. No obstante, la erosión por labranza es muy importante debido a que, en general, en sistemas de producción intensivos se requiere varias operaciones de labranza, donde se incluye sistemas mecanizados y no mecanizados. Entre más operaciones de labranza se efectúa al año, mayor es el riesgo de erosión.

El uso de terrazas en contorno o el uso de franjas verdes, que es una práctica conservacionista recomendada para reducir el potencial de la erosión hídrica en muchas partes del mundo, tiene serias implicaciones para la erosión por labranza, productividad de suelos y producción de cultivos. Las terrazas y franjas verdes actúan como bordes de campo o líneas de flujo nulo de suelo, pero la erosión por labranza en la terraza aumenta proporcionalmente con el número de bordes. Eventualmente, el traslado por labranza va a provocar una pérdida severa de suelo y un recorte de la pendiente en el lado a su favor (Figura 3). En Ecuador, Dercon et al. (2003, 2006) reportaron que la erosión por labranza fue la principal causa de una gran variabilidad espacial en propiedades del suelo y de respuesta del cultivo hacia la parte

baja de las terrazas. Las cosechas fueron bajas en forma consistente en la parte alta de la terraza debido a la reducción de la capa superficial del suelo a una mezcla del subsuelo con el suelo superficial. Esto explica por qué la siembra en contorno no genera las altas producciones que el agricultor espera en muchas regiones del mundo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La erosión por labranza es un proceso importante en suelos volcánicos de altura en Costa Rica. El arado de disco tuvo el potencial de mover cantidades significativas de suelo a largas distancias (hasta 7,6 m), lo cual lo hace un implemento muy erosivo si es usado inadecuadamente. La gradiente de la pendiente, tiene una relación directa con la movilización de suelo al prepararse en las 2 direcciones (favor y en contra) de la pendiente y a favor de la pendiente solamente.

El utilizar el arado de disco a favor de la pendiente hace que movimiento de suelo sea 2,5 veces mayor, que al utilizarse en contra de la pendiente, por lo que se recomienda hacer labranza en sentido contrario a la pendiente. Por otro lado, si se realiza labranza perpendicular a la pendiente, la descarga del suelo debe ser en el sentido contrario a la pendiente. Si bien el costo energético es mayor al hacer labranza en sentido contrario a la pendiente, el efecto de los sedimentos en los embalses, caminos, pueblos y ríos tiene un costo social y económico. El lograr medir en forma precisa estos costos resultaría de gran utilidad en estudios futuros para la toma de decisiones de políticas agrarias.

La erosión por labranza puede ser controlada modificando las prácticas de labranza. Esta erosión se puede aminorar reduciendo la frecuencia de las operaciones de labranza, con la adopción de sistemas de cultivo de labranza reducida o mediante el uso de rotaciones prolongadas con cultivos que requieren menos labranza (e.g. forrajes). Sin embargo, la producción de vegetales, especialmente papa, siempre va a involucrar alguna forma de distorsión del suelo. En estos

sistemas es importante seleccionar los implementos y la conducción de operaciones de labranza, de tal forma que minimice la erosión. Aunque esto podría reducir y eventualmente detener la erosión por labranza, algunas veces se necesita medidas extremas para revertir el impacto negativo de la erosión por labranza. Las posiciones en el paisaje, que son generalmente más susceptibles a la erosión por labranza (i.e., cimas, parte baja de las divisiones de parcelas), son además áreas que regeneran suelo más lentamente. En estos casos, la única opción viable puede ser transportar suelo que se ha acumulado en la base de las colinas hasta las partes alta de la pendiente donde más se ha erodado.

Una disminución en la erosión por labranza es necesaria para reducir pérdidas de suelo y mantener una producción de cultivos viable a largo plazo en esta región de Costa Rica. Sin embargo, es sumamente importante que todos los procesos erosivos (viento, agua, gravedad y labranza) sean considerados cuando se escogen los implementos y se desarrollan planes de manejo para mejorar las estrategias de conservación de suelos para suelos de ladera con producción vegetal en Costa Rica y en Latinoamérica.

AGRADECIMIENTO

Al Instituto interamericano de Cooperación para la Agricultura de Canadá, el Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica, el Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica, y el Consejo de Investigación de Ciencias Naturales e Ingeniería de Canadá, por su financiamiento, soporte técnico y logístico.

LITERATURA CITADA

- ALVARADO A., BERTSCH F., BORNEMISZA E., FORSYTHE W., HENRÍQUEZ C., MATA R., MOLINA E., SALAS R. 2001. Suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) de Costa Rica. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS), San José, CR., 111 p.

- BERTSCH F. 2006. El recurso tierra en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 30:133-156.
- DERCON G. 2001. Tillage erosion assessment in the Austro Ecuatoriano. Ph.D. Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium.
- DERCON G., DECKERS J., GOVERS G., POESEN J., SANCHEZ H., VANEGAS R., RAMIREZ M., LOAIZA G. 2003. Spatial variability in soil properties on slow-forming terraces in the Andes region of Ecuador. *Soil and Tillage Research* 72:31-41.
- DERCON G., DECKERS J., POESEN J., GOVERS G., SANCHEZ H., RAMIREZ M., VANEGAS R., TACURI E., LOAIZA G. 2006. Spatial variability in crop response under contour hedgerow systems in the Andes region of Ecuador. *Soil and Tillage Research* 86:15-26.
- DERCON G., GOVERS G., POESEN J., SANCHEZ H., ROMBAUT K., VANDENBROECK E., LOAIZA G., DECKERS J. 2007. Animal-powered tillage erosion assessment in the southern Andes region of Ecuador. *Geomorphology* 87:4-15.
- GOVERS G., LOBB D., QUINE T. 1999. Tillage erosion and translocation: emergence of a new paradigm in soil erosion research. *Soil and Tillage Research* 51:167-174.
- LI S., LOBB D.A., LINDSTROM M.J. 2007. Tillage translocation and tillage erosion in cereal-based production in Manitoba, Canada. *Soil and Tillage Research* 94:164-182.
- LINDSTROM M.J., NELSON W.W., SCHUMACHER T.E. 1992. Quantifying tillage erosion rates due to moldboard plowing. *Soil and Tillage Research* 24:243-255.
- LOBB D.A. 2000. The impact of sample increment size on the measurement of tillage translocation. *Manitoba Society of Soil Science Meetings*, Winnipeg, MB, Canada.
- LOBB D.A. 2002. Tillage erosion, measurement techniques. pp. 1327-1329. In: R. Lal (ed). *Encyclopedia of Soil Science*. Marcel Dekker, New York, NY.
- LOBB D.A., KACHANOSKI R.G. 1999. Modelling tillage erosion in the topographically complex landscapes of southwestern Ontario, Canada. *Soil and Tillage Research* 51:261-277.
- LOBB D.A., KACHANOSKI R.G., MILLER M.H. 1999. Tillage translocation and tillage erosion in the complex upland landscapes of southwestern Ontario, Canada. *Soil and Tillage Research* 51:189-209.
- LOBB D.A., QUINE T.A., GOVERS G., HECKRATH G.J. 2001. Comparison of methods used to calculate tillage translocation using plot-tracers. *Journal of Soil and Water Conservation* 56:321-328.
- RYMSHAW E., WALTER M.F., VAN WAMBEKE A. 1997. Processes of soil movement on steep cultivated hill slopes in the Venezuelan Andes. *Soil and Tillage Research* 44:265-272.
- SANCHO F. 1991. Medición de pérdidas de suelo a través del empleo de parcelas de escurrimiento. In: W.G. Vahrson, M. Alfaro, G. Palacios (eds). *Memoria del taller de erosión de suelos*. Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
- TIESEN K.H.D., MEHUYS G.R., LOBB D.A., REES H.W. 2007a. Tillage erosion within potato production systems in Atlantic Canada: I. Measurement of tillage translocation by implements used in seedbed preparation. *Soil and Tillage Research* 95:308-319.
- TIESEN K.H.D., LOBB D.A., MEHUYS G.R., REES H.W. 2007b. Tillage erosion within potato production in Atlantic Canada: II. Erosivity of primary and secondary tillage operations. *Soil and Tillage Research* 95:320-331.
- TIESEN K.H.D., LOBB D.A., MEHUYS G.R., REES H.W. 2007c. Tillage translocation and tillage erosivity by planting, hilling and harvesting operations common to potato production in Atlantic Canada. *Soil and Tillage Research* 97:123-139.
- VAN MUYSEN W., GOVERS G., VAN OOST K. 2002. Identification of important factors in the process of tillage erosion: the case of mouldboard tillage. *Soil and Tillage Research* 65:77-93.
- VAN MUYSEN W., GOVERS G., VAN OOST K., VAN ROMPAEY A. 2000. The effect of tillage depth, tillage speed and soil condition on chisel tillage erosivity. *Journal of Soil and Water Conservation* 55:355-364.
- VAN OOST K., GOVERS G., DE ALBA S., QUINE T.A. 2006. Tillage erosion: a review of controlling factors and implications for soil quality. *Progress in Physical Geography* 30:443-466.
- VAHRSON W.G. 1990. El potencial erosivo de la lluvia en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 14:15-24.
- VAHRSON W.G., PALACIOS G. 1993. Datos complementarios de erosión, escurrimiento y pérdida de nutrientes en Cerbatana de Puriscal: Resultados 1991. *Agronomía Costarricense* 17:95-98.

