

EFECTO DEL MANEJO DE LA COBERTURA VEGETAL SOBRE LA EROSIÓN HÍDRICA EN CAFETALES DE SOMBRA

EFFECT OF VEGETATION COVER MANAGEMENT ON WATER EROSION IN SHADE COFFEE PLANTATIONS

Daniel Geissert¹, Ana Mólgora-Tapia², Simoneta Negrete-Yankelevich¹, Robert Hunter Manson¹

¹Red de Ecología Funcional. Instituto de Ecología, A.C. 91070. Xalapa, Veracruz. (robert.manson@inecol.mx). ²Posgrado en Ciencias. Instituto de Ecología, A.C. 91070. Xalapa, Veracruz.

RESUMEN

Estudios sobre el manejo de la cobertura herbácea mostraron que el chapeo (corte con machete) controla la erosión del suelo en cafetales ubicados sobre pendientes. Sin embargo, un número creciente de productores prefiere utilizar herbicidas para bajar el costo del chapeo, sin saber si este cambio de práctica incrementa la erosión del suelo y disminuye la productividad a largo plazo. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue analizar la relación entre la cobertura vegetal (arbórea, arbustiva, herbácea y de hojarasca) y la tasa de erosión, y cuantificar los efectos del chapeo y del herbicida, en cuatro cafetales de sombra del centro del estado de Veracruz, México. En cada finca se instalaron tres bloques con tres parcelas rectangulares de 8×4 m cada uno. Los tratamientos chapeo, herbicida y testigo se distribuyeron al azar entre las parcelas de cada bloque. La erosión del suelo se midió con siete estacas por parcela, de mayo 2012 a abril 2013. La pérdida de suelo tuvo valores negativos y la sedimentación valores positivos. El grado de cobertura arbórea se midió en julio 2012 y los de cobertura herbácea, hojarasca y suelo desnudo en marzo 2013. La erosión neta promedio anual fue -33.5 ± 38.6 Mg ha⁻¹ en las parcelas testigo, -34.1 ± 33.8 Mg ha⁻¹ en las de chapeo y -20.0 ± 32.1 Mg ha⁻¹ en las tratadas con herbicida. Un modelo lineal mixto por máxima verosimilitud indicó que solo la cobertura herbácea tuvo un efecto reductor sobre la tasa de erosión neta, mientras que la cobertura arbórea tuvo el efecto opuesto. La aplicación de herbicida aumentó la erosión sólo en dos fincas, por lo cual su efecto no fue concluyente. El estudio contribuyó al entendimiento de la erosión en cafetales de sombra con manejo variable de la cobertura vegetal.

ABSTRACT

Studies on management of weed cover have shown that chapeo (cutting with a machete) helps control soil erosion in coffee plantations located on slopes. However, a growing number of coffee producers prefer to use herbicides to lower the cost of weed control, not knowing whether this change in practice may increase soil erosion and decrease long-term productivity. Therefore, the objective of this study was to analyze the relationship between plant cover (trees, coffee bushes, herbaceous plants, and litterfall) and soil erosion rates, and to quantify the effects of both chapeo and herbicides in four shade coffee plantations in central Veracruz, Mexico. On each farm, three blocks, each with three rectangular 8×4 m plots were established. Soil erosion was measured with seven stakes per plot from May 2012 to April 2013. Negative values were assigned to soil loss and positive values to sedimentation. The degree of tree cover was measured in July 2012 and that of herbaceous plants, litterfall, and bare soil in March 2013. Average annual net erosion was -33.5 ± 38.6 Mg ha⁻¹ in the control plots, -34.1 ± 33.8 Mg ha⁻¹ in chapeo plots, and -20.0 ± 32.1 Mg ha⁻¹ in herbicide treated plots. A mixed linear model through maximum likelihood indicated that only the herbaceous plant cover had a reducing effect on the net erosion rate, while tree cover had the opposite effect. Herbicide application increased erosion on only two farms, and therefore its effect was not conclusive. The study contributed to understanding erosion in shade coffee plantations with variable management of plant cover.

Key words: Agroforestry, coffee, erosion, mixed linear model.

INTRODUCTION

In Mexico, shade coffee production systems, categorized qualitatively as rustic, traditional polyculture, commercial polyculture and

*Autor responsable ❖ Author for correspondence.

Recibido: abril, 2016. Aprobado: julio, 2016.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 51: 119-133. 2017.

Palabras clave: Agroforestería, café, erosión, modelo lineal mixto.

INTRODUCCIÓN

En México, los sistemas de producción con café de sombra reconocidos de forma cualitativa como rústicos, policultivos tradicionales, policultivos comerciales y monocultivos a sombra (Moguel y Toledo, 1999; 2004), representan 90 % de la superficie plantada y casi dos terceras partes están bajo manejo tradicional (Manson *et al.*, 2008). El estado de Veracruz es el segundo estado productor de café del país (SIAP-SAGARPA, 2015) y la mayoría de las fincas se ubica en terrenos con pendientes fuertes (15°-35°) con riesgo de erosión hídrica y degradación de las tierras (Rosas-Arellano *et al.*, 2008; Pérez-Portilla y Geissert-Kientz, 2006). A causa de la crisis en el sector cafetalero mexicano, muchos productores buscan intensificar el manejo de los cafetales, para mejorar los rendimientos y reducir el costo de la mano de obra. Una práctica intensiva de manejo es el uso de herbicidas para controlar las plantas arvenses, lo cual puede aumentar la erosión del suelo (Ataroff y Monasterio, 1997; Arellano, 2000). Los principales efectos de la erosión en una finca son la degradación de las propiedades hidrofísicas, químicas y biológicas del suelo, en detrimento de la producción de los cultivos, mientras que fuera de ella, están la sedimentación en ríos y embalses, el deterioro de la calidad del agua y los cambios en los patrones hidrológicos (Sidle *et al.*, 2006).

La tasa de pérdida de suelo en cafetales es comparable con la de bosques o pastizales naturales sobre pendientes escarpadas (0.01 a 5 Mg ha⁻¹ año⁻¹), pero difiere de la de terrenos agrícolas (0.1 a 400 Mg ha⁻¹ año⁻¹) (Pimentel y Kounang, 1998). La tendencia general es 0.38-0.79 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en cafetales de sombra y 0.31-1.57 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en cafetales de sol (Ataroff y Monasterio, 1997; Arellano, 2000; Afandi *et al.*, 2002). Aunque la pérdida de suelo en cafetales en general no rebasa 5 Mg ha⁻¹ año⁻¹, la diversidad de la estructura vertical de la vegetación y las variantes del manejo de la cobertura herbácea, modulan dicha tasa (Quiroz-Marín e Hincapié-Gómez, 2007; Pérez-Nieto *et al.*, 2012). Bajo distintas coberturas a ras del suelo, las tasas de pérdida oscilan entre 0.0 y 2.7 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en cafetales de sol (Afandi *et al.*, 2003; Quiroz-Marín e Hincapié-Gómez, 2007)

(Moguel and Toledo, 1999; 2004), cover 90 % of the area planted in coffee, and almost two thirds are under traditional management (Manson *et al.*, 2008). The state of Veracruz is the second largest coffee-producing state of the country (SIAP-SAGARPA, 2015) and most plantations are located on steep slopes (15° to 35°) with risk of water erosion and soil degradation (Rosas-Arellano *et al.*, 2008; Pérez-Portilla and Geissert-Kientz, 2006). Because of the crisis in the Mexican coffee sector, many growers are seeking ways to intensify production, improve yields and reduce labor costs. One intensive management practice is the use of herbicides for weed control, which could increase soil erosion (Ataroff and Monasterio, 1997; Arellano, 2000). The main effects of erosion on a plantation are degradation of hydrophysical, chemical, and biological properties of the soil, to the detriment of crop production, while effects outside the plantation include sedimentation in rivers and reservoirs, deterioration of water quality, and changes in hydrological patterns (Sidle *et al.*, 2006).

The rate of soil loss in coffee plantations is comparable to that in natural forests or grasslands on steep slopes (0.01 to 5 Mg ha⁻¹ year⁻¹), but differs from that in farmland (0.1 to 400 Mg ha⁻¹ year⁻¹) (Pimentel and Kounang, 1998). The general trend is 0.38 to 0.79 Mg ha⁻¹ year⁻¹ in shade coffee plantations and 0.31 to 1.57 Mg ha⁻¹ year⁻¹ in sun coffee plantations (Ataroff and Monasterio, 1997; Arellano, 2000; Afandi *et al.*, 2002). Although soil loss in coffee plantations does not generally surpass 5 Mg ha⁻¹ year⁻¹, the diversity of the vegetation vertical structure and the variants in management of the herbaceous plant cover can modulate this rate (Quiroz-Marín and Hincapié-Gómez, 2007; Pérez-Nieto *et al.*, 2012). Under different levels of soil cover, loss rates oscillate between 0.0 and 2.7 Mg ha⁻¹ year⁻¹ in sun coffee (Afandi *et al.*, 2003; Quiroz-Marín and Hincapié-Gómez, 2007) and between 0.42 and 2.02 Mg ha⁻¹ year⁻¹ in shade plantations (Arellano, 2000; Pérez-Nieto *et al.*, 2005). However, in the former, the absence of herbaceous plant cover can cause erosion of up to 22 Mg ha⁻¹ year⁻¹ (Afandi *et al.*, 2002).

These values, obtained from measurements in runoff plots equipped with collectors, vary in terms of measurement periods, plot size, number

y entre 0.42 y 2.02 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en cafetales de sombra (Arellano, 2000; Pérez-Nieto *et al.*, 2005), aunque en los primeros la ausencia de cobertura herbácea puede ocasionar una erosión de hasta 22 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (Afandi *et al.*, 2002).

Las cifras anteriores, obtenidas de mediciones en parcelas de escurrimiento equipadas con colectores, varían en periodos de medición, tamaño de parcela, número de repeticiones y tipos de manejo, lo cual dificulta la comparación de resultados sobre el efecto de la cobertura vegetal en el control de la erosión. Según Boix-Fayos *et al.* (2006), el agotamiento a largo plazo del material disponible para ser erosionado en parcelas cerradas, los procesos erosivos actuando a diferentes escalas espaciales y temporales, la heterogeneidad, continuidad y conectividad de los factores detonantes, y los diferentes métodos de medición en campo, son también fuentes de variación de los resultados. De los dos grupos de métodos (de Ploey y Gabriels, 1980; Hudson *et al.*, 1993), los volumétricos usan estacas y perfiladores para medir la erosión de forma indirecta, como consecuencia del rebajamiento microtopográfico y la sedimentación, y sus principales ventajas son proporcionar mediciones con un error mínimo, perturbar poco el terreno, ser fáciles de usar en un diseño experimental con réplicas, y poco onerosos. En contraste, los métodos dinámicos que miden de forma directa los procesos de escurrimiento en parcelas de escurrimiento o microcuencas dotadas de un sistema de tanques colectores y divisores, causan más perturbación del terreno y requieren instalaciones onerosas (Marín y Desir, 2003).

El manejo de la cobertura a ras del suelo en un cafetal de sombra reduce la erosión de 19-185 Mg ha⁻¹ año⁻¹ a 0.0-3.4 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (Sidle *et al.*, 2006). En consecuencia, es razonable pensar que el chapeo de las arvenses (corte manual con machete) pudiera prevenir la erosión y así contribuir a una mayor sustentabilidad del cultivo, lo cual a largo plazo reduciría los costos de mantenimiento del cafetal. En el estado de Veracruz, sin embargo, cada vez más productores eliminan las arvenses con herbicidas para disminuir el costo de jornales para el chapeo, sin conocer las consecuencias de esta práctica sobre la erosión del suelo y la productividad de la finca. Hasta ahora no hay un entendimiento suficiente del efecto de la cobertura de los distintos estratos vegetales de una finca sobre la erosión del suelo. Por lo tanto, el

of replications, and types of management, making comparison of the results of the effect of plant cover in erosion control difficult. According to Boix-Fayos *et al.* (2006) other sources of variation affecting these results include the long term depletion of the material available for erosion in closed plots, erosive processes acting at different spatial and temporal scales, the heterogeneity, continuity and connectivity of detonating factors, and different measurement methods in the field. Of the two existing groups of methods (de Ploey and Gabriels, 1980; Hudson *et al.*, 1993), volumetric methods use stakes and profilers to measure erosion indirectly, as the consequence of microtopographic wearing and sedimentation. Their main advantages are that they provide measurements with minimal error, cause little disturbance of the terrain, are easy to use in an experimental design with replications, and are cheap. In contrast, dynamic methods measuring the processes of runoff directly in runoff plots or micro-watersheds equipped with a system of collection tanks and dividers, cause more disturbance and require costly installations (Marín and Desir, 2003).

Management of cover near the soil in shade coffee plantations can reduce erosion from 19-185 Mg ha⁻¹ year⁻¹ to 0.0-3.4 Mg ha⁻¹ year⁻¹ (Sidle *et al.*, 2006). Consequently, it is reasonable to suppose that chapeo (manual weed cutting with a machete) could help prevent erosion and thus contribute to greater crop sustainability and reduce plantation maintenance costs in the long term. In the state of Veracruz, however, increasingly more growers eliminate weeds with herbicides to decrease the labor costs of chapeo, without knowledge of the consequences of this practice on soil erosion and farm productivity. To date, there is insufficient understanding of the effect of the cover provided by the plantation's different plant strata on soil erosion. Therefore, the objective of this study was, first, to measure erosion rates and analyze their relationship with tree, bush, herbaceous plant and litter cover, and second, to quantify the effect of traditional chapeo on erosion and compare it with herbicide use. The hypothesis was that tree and weed cover would reduce the rate of erosion and that management of the herbaceous plant stratum with herbicide would generate more erosion than chapeo.

objetivo de este estudio fue primero medir la tasas de erosión y analizar su relación con las coberturas arbórea, arbustiva, herbácea y de hojarasca, y segundo, cuantificar el efecto del chapeo tradicional sobre la erosión en comparación con el uso de herbicida. La hipótesis fue que las coberturas arbórea y herbácea reducirán la tasa de erosión, y que el manejo del estrato herbáceo con herbicida generará más erosión que con el chapeo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en cuatro fincas de la región de Huatusco, estado de Veracruz, entre mayo de 2012 y abril de 2013 (Figura 1). Para reducir la variabilidad ambiental, dichas fincas se seleccionaron por la similitud en estructura y manejo, en policultivo.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The study was conducted on four farms in the region of Huatusco, state of Veracruz, between May 2012 and April 2013 (Figure 1). To reduce environmental variability, farms were selected according to their similarity in structure and management, as diversified or simple poly-cropping (Hernández-Martínez *et al.*, 2009), the degree of soil erodibility (factor K), annual rainfall, and slope length and steepness (Factor LS) (Table 1).

The data used to characterize the soil and calculate erodibility (according to Römken *et al.*, 1997) were obtained in October and November of 2011 from two topsoil samples (0-20 cm) obtained near the measuring plots on each farm. The climate is type (A)C(m), warm with abundant summer rains (Soto and García, 1989), and the dominant soil is Andic acrisol

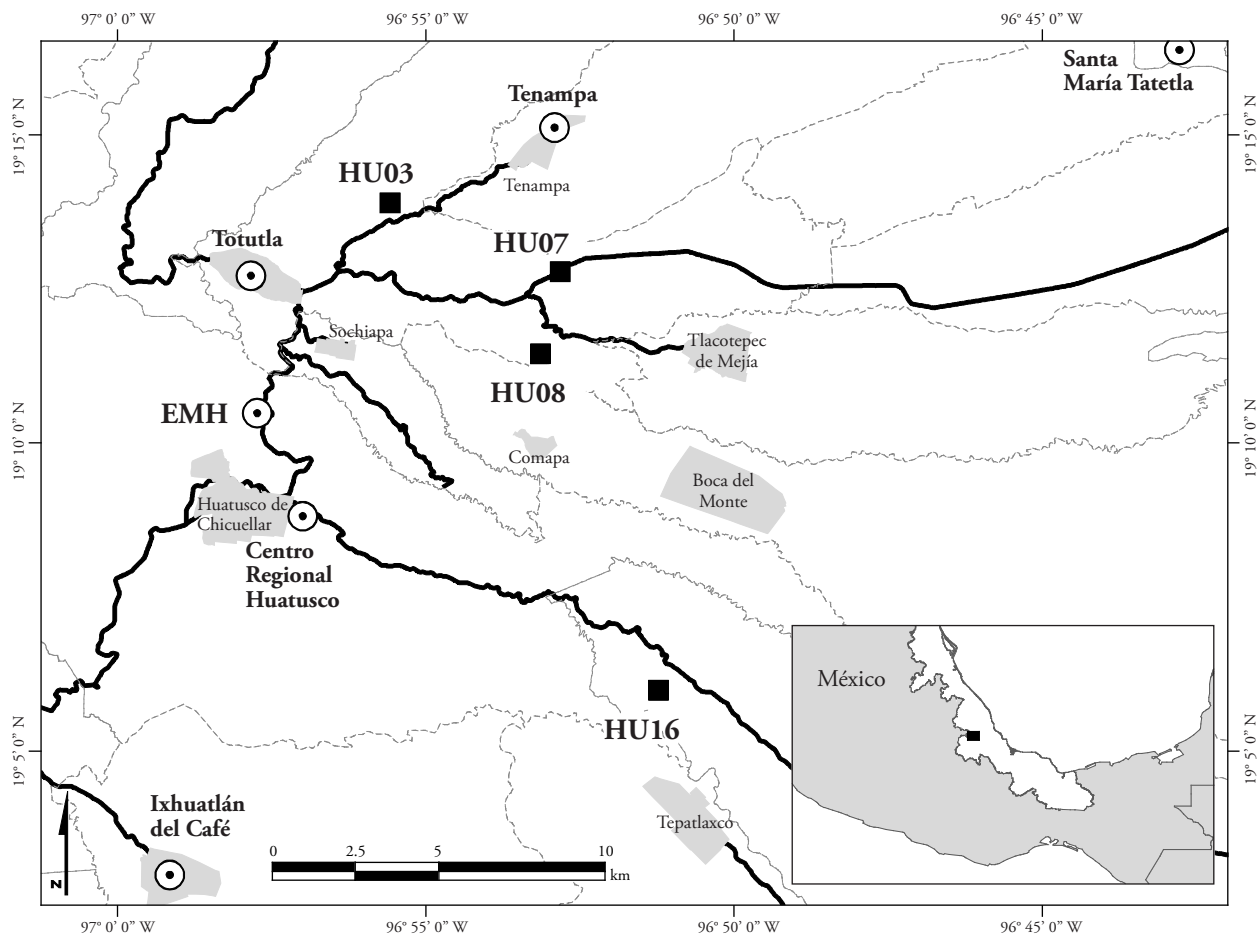


Figura 1. Localización en el centro del estado de Veracruz de las fincas estudiadas. ■: finca; ⊙: estación meteorológica; EMH: estación meteorológica HUCH Huatusco.

Figure 1. Location of the studied farms in central Veracruz. ■: farm; ⊙: weather station; EMH: weather station HUCH Huatusco.

tivos diversificados o simples (Hernández-Martínez *et al.*, 2009), grado de erodabilidad del suelo (factor K), precipitación anual, y longitud y el grado de la pendiente (Factor LS) (Cuadro 1).

Los datos utilizados para caracterizar el suelo y calcular la erodabilidad (según Römken *et al.*, 1997), se obtuvieron de dos muestreos de superficie (0-20 cm) realizados en la misma finca en octubre y noviembre de 2011, cercanos a las parcelas de medición de cada finca. El clima es de tipo (A)C(m), semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano (Soto y García, 1989) y el suelo dominante es Acrisol ándico (Geissert e Ibañez, 2008). Los datos de precipitación diaria e histórica del período de estudio se obtuvieron de la estación meteorológica HUCH Huatusco (19° 10' 29.2" N, 96° 57' 44.8" O y 1426 m de altitud) (Figura 1), a cargo de INIFAP-SAGARPA (<http://clima.inifap.gob.mx/redinifap/est.aspx?est=35873>). La precipitación total anual en cada finca se estimó a partir de la interpolación espacial en ArcGis 10.1 de las nueve estaciones meteorológicas más cercanas (Amatitla, El Coyol, Coscomatepec, Elotepec, Tenampa, Ixhuatlán del Café, Totutla, Centro Regional Huatusco y Santa María Tatetla) de la misma red de monitoreo.

Diseño experimental y tratamientos

En cada finca se delimitaron tres bloques de tres parcelas cada uno, rectangulares de 8×4 m (lado más largo paralelo a la pendiente), en las cuales se asignaron al azar los tratamientos chapeo, herbicida y testigo (Figura 2).

El chapeo consistió en el corte de la hierba con machete, a 10 cm de altura y se realizó en mayo, julio y octubre de 2012. El herbicida se aplicó una vez, en julio, con un aspersor manual de espalda, de la misma manera en las cuatro fincas; se utilizó glifosato en gránulos marca Rival (74.7 % glifosato), disueltos 100 g en 30 L de agua, resultando en una dosis de 521 L ha⁻¹. El control consistió en el corte de hierba con desbrozadora o machete a 5 cm del suelo, conforme a la práctica actual del productor de cada finca.

(Geissert and Ibañez, 2008). Daily and historic precipitation data, during the study period were obtained from the HUCH Huatusco weather station (19° 10' 29.2" N, 96° 57' 44.8" W and 1426 m of altitude) (Figure 1), of INIFAP-SAGARPA (<http://clima.inifap.gob.mx/redinifap/est.aspx?est=35873>). Total annual precipitation for each farm was estimated by spatial interpolation in ArcGis 10.1 using the precipitation recorded by the nine closest weather stations (Amatitla, El Coyol, Coscomatepec, Elotepec, Tenampa, Ixhuatlán del Café, Totutla, Chapingo Regional University Center Huatusco and Santa María Tatetla) from the same network.

Experimental design and treatments

On each farm, three blocks were established, each consisting of three rectangular 8×4 m plots (the longer sides parallel to the slope). A chapeo, herbicide, or control treatment was assigned randomly to each plot (Figure 2).

Chapeo in May, July and October 2012 consisted of cutting weeds with a machete to 10 cm above ground level. Herbicide was applied once in July with a manual backpack sprayer in the same manner on the four farms. Granulated Rival® glyphosate (74.7 % glyphosate) was used (100 g dissolved in 30 L water, resulting in a dosage of 521 L ha⁻¹). The control consisted of cutting weeds with a brush cutter or machete 5 cm from the ground according to each grower's current practice.

Measurement of soil loss

To measure soil loss, 30 cm long, 0.5 cm diameter metal stakes treated with anticorrosive paint were used. A washer was soldered onto each stake 8 cm below the top edge. In each plot seven stakes, distributed to include herbaceous plant cover, litter, and bare soil, were hammered into the plot until the washer was at soil level. The stakes were installed in early May 2012 and were removed at the end of April 2013. The distance between the soil surface and the washer was measured on the downslope side of

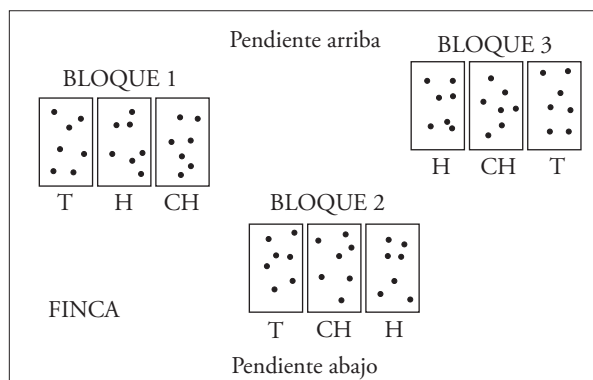


Figura 2. Diseño experimental de bloques y parcelas en finca. Tratamientos: T=testigo, H=herbicida, CH=chapeo. Los puntos negros en cada parcela representan las estacas de medición de la erosión.

Figure 2. Experimental design of blocks and plots on farms. Treatments: T=control, H=herbicide, CH=chapeo. Black dots in each plot represent the stakes for measuring erosion.

Cuadro 1. Características ambientales de las fincas estudiadas.
Table 1. Environmental characteristics of the studied farms.

Agroecosistema	HU03 Policultivo diversificado	HU07 Policultivo diversificado	HU08 Policultivo diversificado	HU16 Policultivo simple
Coordenadas geográficas	19.2317 N; 96.92640 O	19.21306 N; 96.88047 O	19.190798 N; 96.885825 O	19.09994 N; 96.85397 O
Municipio	Totutla	Totutla	Totutla	Zentla
Altitud (msnm)	1240	1020	1080	890
Precipitación anual (mm)	1850	1750	1800	1750
Variedad de café y edad	Típica, Mundo Novo, Oro Azteca. Distintas edades.	Garnica y Bourbon. Distintas edades.	Colombia y Costa Rica. Cinco años.	Típica, Robusta y Caturra. Cinco años.
Principales especies de árboles	Ixpepe (<i>Trema micrantha</i>), cedro rosado (<i>Acrocarpus fraxinifolius</i>), guarumbo (<i>Cecropia obtusifolia</i>), chalahuite (<i>Inga</i> spp.)	Carne de caballo (<i>Alchornea latifolia</i>), palo mulato (<i>Bursera spp.</i>), ixpepe, níspero (<i>Eriobotrya japónica</i>), limón (<i>Citrus arantifolia</i>), chalahuite	Cedro rosado, guarumbo, chalahuite	Roble (<i>Quercus xalapensis</i>), cedro rojo (<i>Cedrela odorata</i>), chalahuite
Densidad de cafeto (plantas ha ⁻¹)	1900	2600	2700	3300
Diámetro medio de dosel de cafeto (m)	2	1.58	2.14	1.6
Manejo de hierba	Chapeo con desbrozadora	Chapeo con desbrozadora	Chapeo con desbrozadora	Chapeo con desbrozadora
Frecuencia	3 veces al año	2 veces al año	2 veces al año	2 veces al año
Longitud de ladera (m)	60	58	80	60
Pendiente (°)	18	17	18	26
Factor LS (adimensional)	9.17	9.04	10.67	11.41
Textura	Franco-arcillosa	Arcillosa	Arcillosa	Arcillosa
Densidad aparente (Mg m ⁻³)	0.81	0.93	0.81	0.93
Estructura	Bloques angulares, medios a gruesos, desarrollo moderado a fuerte	Bloques subangulares, finos y medios, desarrollo moderado	Bloques angulares y subangulares, medios a gruesos, desarrollo moderado a fuerte.	Bloques angulares medios y gruesos, desarrollo moderado a fuerte
Materia orgánica (%)	11	4.5	8.7	9.9
Erodabilidad (factor K, en Mg h MJ ⁻¹ mm ⁻¹)	0.10	0.05	0.06	0.06

Medición de pérdida de suelo

Para esta medición se usaron estacas de 30 cm de largo y 0.5 cm de diámetro, metálicas y tratadas con pintura anti-corrosiva. A los 8 cm de su borde superior se soldó una rondana. En cada parcela se clavaron siete estacas hasta que la rondana quedara al nivel del suelo, distribuidas para abarcar la cobertura herbácea, de hojarasca y el suelo desnudo. Las estacas se instalaron a principios de mayo del 2012 y se retiraron a finales de abril del 2013. La distancia entre la superficie del suelo y la rondana se midió con un vernier digital del lado pendiente abajo de la estaca, con una precisión de ± 0.2 mm. En abril del 2013 se realizó en cada finca un total de 63 registros de erosión, de los cuales 21 en cada tratamiento. La erosión media por parcela (E) se expresó en números negativos (pérdida de suelo) y la sedimentación media (S) en números positivos (acumulación de suelo). La erosión neta (EN) se refiere a la diferencia entre la erosión y la sedimentación, expresada en mm o en Mg ha^{-1} y se calculó por parcela como $EN=E+S$, fórmula equivalente a la de Pizarro y Cuitiño (2002) cuando se utilizan valores negativos de E , con las igualdades siguientes:

$$E = \frac{\sum \text{mediciones con pérdida de suelo (mm)}}{\# \text{ total de estacas por parcela}}$$

$$S = \frac{\sum \text{mediciones con acumulación de suelo (mm)}}{\# \text{ total de estacas por parcela}}$$

La conversión en unidades de pérdida de suelo (Mg ha^{-1}) se hizo con la densidad aparente (DA):

$$EN(\text{Mg ha}^{-1}) = EN(\text{mm}) * DA * 10$$

En cada parcela se determinó el grado de cobertura a ras del suelo (herbácea, hojarasca o suelo desnudo) con un estimador visual de porcentajes (Folk, 1951), en marzo de 2013. La cobertura arbórea se estimó en su apogeo en julio de 2012, con un densiómetro esférico cóncavo, a una altura de 1.20 m del suelo. Para la cobertura arbustiva se calculó la densidad de cafetos por parcela (Núm. plantas por cada 32 m^2).

Análisis de la relación entre coberturas vegetales y erosión

La influencia de los tipos de cobertura vegetal y de los tratamientos (chapeo, herbicida, y testigo) sobre la erosión neta se determinó mediante el ajuste de un modelo lineal mixto por máxima verosimilitud. Las variables fijas del modelo incluyeron a los tratamientos, las coberturas de hierba (%), hojarasca (%),

the stake with a digital Vernier with a precision of ± 0.2 mm. In April 2013, a total of 63 registers of erosion were recorded, 21 in each treatment. Mean erosion per plot (E) was expressed in negative numbers (soil loss) and mean sedimentation (S) in positive numbers (soil accumulation). Net erosion (EN) refers to the difference between erosion and sedimentation, expressed in mm or in Mg ha^{-1} and was calculated for each plot as $EN=E+S$, a formula equivalent to that of Pizarro and Cuitiño (2002) when negative values of E are used with the following equalities:

$$E = \frac{\sum \text{measurements with soil loss (mm)}}{\text{total number of stakes per plot}}$$

$$S = \frac{\sum \text{measurements with soil accumulation (mm)}}{\text{total number of stakes per plot}}$$

The conversion in units of soil loss (Mg ha^{-1}) was performed using bulk density (DA):

$$EN(\text{Mg ha}^{-1}) = EN(\text{mm}) * DA * 10$$

In each plot, the degree of ground cover (weeds, litter or bare soil) was determined using a visual percentage estimator (Folk, 1951) in March 2013. Tree cover was estimated at its peak in July 2012 using a spherical concave densitometer at a height of 1.20 m from the ground. For bush cover, the density of coffee plants per plot was calculated (number of plants per 32 m^2).

Analysis of the relationship between plant cover and erosion

The effect of the types of ground cover and the treatments (chapeo, herbicide, and control) on net erosion was determined by adjusting a mixed linear model using maximum likelihood. The fixed variables of the model included the treatments, herbaceous plant cover (%), litter (%), and bare soil (%) recorded in March 2013 (the date on which there was greatest contrast among the treatments (with herbicide, chapeo and control), density of coffee plants per plot, and tree canopy cover. The random effect factors corresponded to the blocks of plots nested within farm.

The spatial structure of the sampling design did not allow us to perform a simple ANOVA since none of the observations contributed with a complete degree of freedom and random factors were included in the analysis. To find the minimal adequate model, a simplification process (*Stepwise*) was carried out, making comparisons between the models that progressively included and excluded the different fixed variables and their

suelo desnudo (%) registradas en marzo del 2013 (fecha en la cual se obtuvo el mayor contraste entre los tratamientos con herbicida, chapeo y testigo), la densidad de cafetos por parcela y la cobertura de dosel arbóreo. Los factores de efecto aleatorio correspondieron a los bloques de parcelas anidados en finca.

La estructura espacial del diseño de muestreo no nos permitió realizar un ANDEVA simple, ya que cada observación no contribuyó con un grado de libertad completo y se incluyeron factores aleatorios en el análisis. Para encontrar el modelo mínimo adecuado se realizó un proceso de simplificación (*Stepwise*), haciendo comparaciones entre los modelos que incluían y excluían progresivamente las diferentes variables fijas y sus interacciones de segundo orden (Crawley, 2007). Esto se hizo para optimizar la selección de las variables más explicativas y ortogonales, y para evitar redundancia en el modelo final (Crawley, 2007). Para comparar los modelos anidados en el proceso de simplificación se usó el criterio de parsimonia mediante la comparación del Coeficiente de Información Akaike (CIA), para lo cual se calculó la diferencia de cada CIA (Δ CIA) respecto al del modelo máximo. El modelo seleccionado fue el de menor número de variables explicativas y un Δ CIA menor o igual a seis respecto al modelo con el Δ CIA más grande (Cayuela, 2012; Richards, 2015). El análisis de datos se hizo con el lenguaje y entorno estadístico R (R Studio 0.98.994, *R Development Core Team*, www.r-project.org).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tasas de erosión

El año de estudio fue lluvioso (2392 mm), con 22.2 % más precipitación que la media histórica en Huatusco (1938 mm) (Figura 3). La precipitación total observada se repartió en 209 días. La mayor cantidad precipitada se concentró entre junio y agosto, cuando ocurrieron 13 días con lluvia de más de 50 mm. Al aplicar los intervalos de precipitación y de erosividad de Pérez-Nieto *et al.* (2005) a los registros de la estación de Huatusco, se detectaron 51 días con más de 12.7 mm de lluvia (24.4 % del total) que tuvieron un efecto erosivo, entre junio y octubre.

La erosión neta promedio en las parcelas testigo fue -3.5 mm año^{-1} , equivalente a una pérdida de suelo de $-33.5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. La variabilidad alta (error estándar $\pm 38.6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) (Cuadro 2) corrobora que la erosión tiene múltiples causas relacionadas con la complejidad de las interacciones entre variables (Boix-Fayos *et al.*, 2006). La escorrentía

second order interactions. This was done to optimize the selection of the variables that explained the most variation and that were orthogonal, thus reducing redundancy in the final model (Crawley, 2007). To compare the nested models in the process of simplification, the parsimony criterion was used by comparing the Akaike Information Coefficient (AIC), for which the difference of each AIC (Δ AIC) relative to the maximum model was calculated. The selected model was that with the lowest number of explanatory variables and a Δ AIC lower than or equal to six, relative to the model with the highest Δ AIC (Cayuela, 2012; Richards, 2015). Data were analyzed using the R statistical language and environment (Studio 0.98.994, *R Development Core Team*, www.r-project.org).

RESULTS AND DISCUSSION

Erosion rates

Rainfall was high during the study year (2392 mm), with 22.2 % more precipitation than the historical mean in Huatusco (1938 mm) (Figure 3). Total rainfall was distributed over 209 days. Most of the rainfall was concentrated in the months of June to August, when there were 13 days with more than 50 mm of rain. When the intervals of precipitation and erosivity of Pérez-Nieto *et al.* (2005) were applied to registers of the Huatusco weather station, 51 days between June and October were detected with more

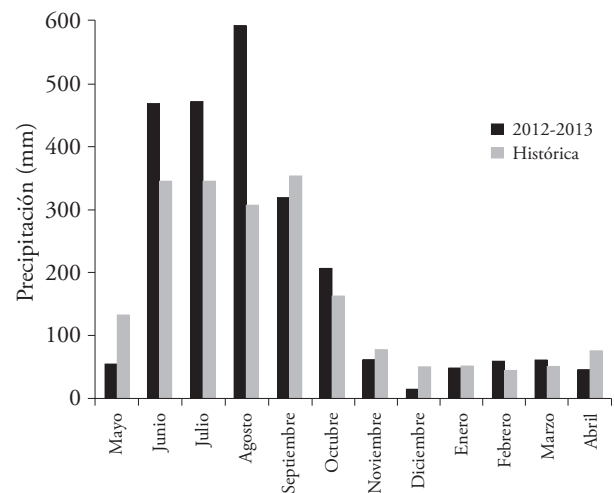


Figura 3. Precipitación mensual registrada en la estación meteorológica HUCH Huatusco del INIFAP, ubicada en el municipio de Huatusco, Veracruz.

Figure 3. Monthly precipitation recorded in the INIFAP HUCH Huatusco weather station located in the municipality of Huatusco, Veracruz.

Cuadro 2. Erosión neta (negativo) y sedimentación neta (positivo) por finca y por tratamiento, con su respectivo error estándar.**Table 2. Net erosion (negative) and net sedimentation (positive) by farm and by treatment with the respective standard error.**

Tratamiento		HU03	HU07	HU08	HU16	Media
Testigo	mm	-0.3±1.4	-7.6±3.5	2.5±4.7	-8.7±2.9	-3.5±4.7
	Mg ha ⁻¹ año ⁻¹	-2.3±25.6	-71.4±32.9	20.1±39.1	-80.5±25.9	-33.5±38.6
Chapeo	mm	-0.8±0.8	-8.5±2.8	-0.01±3.8	-6.1±5.5	-3.83±3.6
	Mg ha ⁻¹ año ⁻¹	-7±7.1	-85.1±33.3	-19.2±31.3	-56.5±51.8	-34.1±33.8
Herbicida	mm	0.8±2.5	-4.4±2.1	-5.3±4.5	-6.1±5.7	-3.7±3.5
	Mg ha ⁻¹ año ⁻¹	6.6±20.7	-40±19.3	-32.8±37.1	-13.8±52.9	-20±32.1

responsable de la erosión fue en su mayoría de tipo laminar y ocasionalmente en forma de surcos.

De las fincas con erosión neta, HU03 presentó la tasa menor, a pesar de un mayor grado de erodabilidad del suelo que en las otras (Cuadro 1). En la finca HU16 la tasa de erosión fue la más alta, lo cual puede relacionarse con una pendiente más fuerte. En HU08 hubo sedimentación neta, producto del tránsito de partículas y agregados del suelo, y su acumulación dentro de las parcelas. Estudios previos en cafetales de sombra no señalaron una sedimentación neta porque las mediciones se hicieron en parcelas de escurrimiento, de las cuales se obtuvo un valor global de pérdida de suelo, sin posibilidad de cuantificar sus manifestaciones dentro de las parcelas. La finca HU07 tuvo una tasa de erosión alta y parecida a HU16, en condiciones similares de precipitación y de erodabilidad, a pesar de una pendiente de menor inclinación.

Las tasas de erosión en las fincas HU07 y HU16 rebasaron el límite máximo de tolerancia de 12.5 Mg ha⁻¹ año⁻¹ establecido por el US Soil Conservation Service (Soil Survey Division Staff, 1993) para suelos profundos y menos susceptibles a la erosión. Sin embargo, es preferible fijar los límites de tolerancia sobre la base de la producción sustentable de cultivos, que tome en cuenta la conservación de la materia orgánica y de los nutrientes (Young, 1989). En este sentido y de acuerdo con los grados de erosión en sistemas de producción de café de sol y sombra establecidos por el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé) de Colombia (Gómez-Aristizábal y Rivera-Posada, 1993), las fincas HU07 y HU16 rebasaron el límite máximo de tolerancia de 3 Mg ha⁻¹ año⁻¹

than 12.7 mm of rain (24.4 % of the total), which had an erosive effect.

Average net erosion in the control plots was -3.5 mm year⁻¹, equivalent to soil loss of -33.5 Mg ha⁻¹ year⁻¹. The high variability (standard error ±38.6 Mg ha⁻¹ year⁻¹) (Table 2) corroborates that erosion has multiple causes related to the complexity of the interactions among variables (Boix-Fayos *et al.*, 2006). The runoff responsible for the erosion was mostly laminar (sheet erosion) and occasionally in small furrows (rill erosion).

Of the farms with net erosion, HU03 had the lowest rate despite having a higher degree of soil erodibility than the others (Table 1). Farm HU16 had the highest erosion rate, possibly related to a steeper slope. On HU08 there was net sedimentation, resulting from transit of soil particles and aggregates and their accumulation in the plots. Previous studies in shade coffee plantations never reported net sedimentation because the measurements were made in runoff plots, from which an overall value for soil loss was obtained so that there was no possibility of quantifying accumulation within the plots. Farm HU07 had a high rate of erosion, as did HU16, which had similar conditions of precipitation and erodibility despite a less steep slope.

Erosion rates on farms HU07 and HU16 surpassed the maximum tolerance limit of 12.5 Mg ha⁻¹ year⁻¹ established by the US Soil Conservation Service (Soil Survey Division Staff, 1993) for deep soils that are less susceptible to erosion. However, it is preferable to fix tolerance limits based on sustainable crop production, which takes into account conservation of organic matter and nutrients (Young, 1989).

y la erosión fue muy severa ($>30 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). Al contrario, el grado de erosión fue bajo ($1.0\text{-}3.0 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) en HU03 y natural ($< 1.0 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) en HU08. Estos resultados muestran que en cafetales de sombra la pérdida de suelo por erosión no siempre es inferior a $5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, como lo indicaron Ataroff y Monasterio (1997), Arellano (2000) y Pérez-Nieto *et al.* (2005). Los valores altos en HU07 y HU16 pueden estar sobrestimados al tomar la medición en la parte pendiente abajo de la estaca, ya que el escurrimiento del agua a lo largo de la estaca y la consecuente turbulencia en su base, incrementan en este punto la escorrentía, aun en estacas de 5 mm de grosor. Sin embargo, tomar la medición pendiente abajo de la estaca es un procedimiento que simula adecuadamente el proceso de erosión que ocurre en fincas sobre terrenos inclinados, el cual se inicia a menudo en la base de los troncos de los cafetos, según observaciones propias. La posible sobrestimación de la erosión con la técnica de las estacas respecto a las mediciones con colectores de sedimentos es un problema metodológico aun no resuelto (Marín y Desir, 2003).

Efectos de las coberturas vegetales y de su manejo sobre la erosión

El modelo lineal mixto reveló que de las coberturas a ras del suelo (hierba, hojarasca, suelo desnudo), sólo la herbácea tuvo un efecto sobre la tasa de erosión. La segunda variable fija explicativa de la erosión fue la cobertura arbórea (% dosel). El modelo final respecto a los factores fijos fue:

$$\text{Erosión neta (mm)} = 19.56 + (0.06 * \% \text{ cobertura de hierba}) + (-0.28 * \% \text{ dosel})$$

El Coeficiente de Información de Akaike fue 236.68, con un ΔCIA de 3.57, respecto al modelo con menor CIA y de -17.84 respecto al CIA máximo (Cuadro 3). La varianza estimada de los factores aleatorios fue 1.592 (con $\text{IC}_{95\%}$ 0.32-0.82) y la residual 2.52 (con $\text{IC}_{95\%}$ 3.04-5.28).

El modelo estimó una erosión promedio en las parcelas de estudio de 19.56 mm ($\text{IC}_{95\%}$ 1.5-37.7 mm); a mayor cobertura de hierba hubo menor erosión y en algunos casos, incluso sedimentación (Figura 4), aunque la cobertura herbácea fue poco explicativa (pendiente 0.06; con $\text{IC}_{95\%}$ $-0.01\text{-}0.12$). La

In this regard, using the degrees of erosion in sun and shade coffee production systems established by Columbia's Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé) (Gómez-Aristizábal and Rivera-Posada, 1993), farms HU07 and HU16 surpassed the maximum tolerance limit of $3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$, and erosion was very severe ($>30 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$). In contrast, the degree of erosion was very low ($1.0\text{-}3.0 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) on HU03 and natural ($<1.0 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) on HU08. These results show that soil loss by erosion in shade coffee plantations is not always below $5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$, as reported by Ataroff and Monasterio (1997), Arellano (2000) and Pérez-Nieto *et al.* (2005). The high values on HU07 and HU16 may be overestimates since measurements were taken on the slope directly below the stake. Here, water runoff around the stake increases turbulence even with 5 mm thick stakes. However, taking measurement downslope from stakes is a procedure that should adequately simulate the erosion process that occurs on farms located on sloping terrains where, according to our own observations, erosion often begins at the base of the coffee plant trunks. The possible overestimation of erosion with the stake technique, relative to measurements from sediment collectors, is a methodological problem that has yet to be solved (Marín and Desir, 2003).

Effects of plant covers and their management on erosion

The mixed linear model revealed that, of the possible ground covers (weeds, litter, bare soil), only weeds had an effect on erosion rate. The second fixed explanatory variable was tree cover (% canopy). The final fixed factor model was:

$$\text{Net erosion (mm)} = 19.56 + (0.06 * \% \text{ weed cover}) + (-0.28 * \% \text{ canopy})$$

The Akaike Information Coefficient was 236.68, with a ΔAIC of 3.57, relative to the model with the lowest AIC and -17.84 , relative to the maximum AIC (Table 3). The estimated variance from random factors was 1.592 (with $\text{CI}_{95\%}$ 0.32-0.82) and residual 2.52 (with $\text{CI}_{95\%}$ 3.04-5.28).

The model estimated an average erosion in the study plots of 19.56 mm ($\text{CI}_{95\%}$ 1.5-37.7 mm). With more weed cover, there was less erosion, and in

Cuadro 3. Modelos mixtos que explican la erosión y que en el proceso de simplificación de modelos tuvieron un Δ CIA (diferencia con el CIA mínimo) menor o igual a 6.
Table 3. Mixed effect models that explain erosion and that, in the process of model simplification had a Δ AIC (difference from the minimum AIC) below or equal to 6.

VARIABLES FIJAS DEL MODELO [†]	CIA	Δ CIA
Ch + H + Sd + Dc + Cd	239.03	6
Ch + H + Sd + Cd	237.06	4
Ch + Sd + Cd	235.08	2
Ch + Cd [‡]	236.69	3
Ch + Sd + Cd + Tr	238.92	6
Ch + Sd + Cd + Ch*Sd + Ch*Cd	239.25	6
Ch + Sd + Cd + Ch*Cd	237.25	4
Ch + Sd + Cd + Ch*Sd	236.01	3
Tr + Ch + Sd + H + Cd + Dc + Tr*Ch + Tr*H + Tr*Cd + Tr*Dc + Tr*Sd	235.82	3
Tr + Ch + Sd + H + Cd + Dc + Tr*Ch + Tr*H + Tr*Cd + Tr*Dc [§]	233.12	0

[†]Solamente se mencionan las variables fijas de los modelos contrastados: Tratamiento (Tr), cobertura de hierba (Ch), hojarasca (H), suelo desnudo (Sd) y densidad de cafetos (Dc) de marzo de 2013, cobertura de dosel (Cd) de julio de 2012. Los factores aleatorios se mantuvieron constantes y fueron Finca anidada en Bloque. [‡]Modelo elegido por su mejor poder explicativo porque tiene el menor número de variables fijas dentro del grupo de modelos con un Δ CIA menor a 6. [§]Modelo que durante el proceso de simplificación de modelos tuvo el CIA mínimo. [¶]Only fixed variables of the contrasted models are mentioned: Treatment (Tr), weed cover (Ch), litter (H), bare soil (Sd) and coffee plant density (Dc) in March 2013, canopy cover (Cd) in July 2012. The random factors remained constant and were Farm nested in Block. [¶]Models were selected for their better explanatory power, their lower number of fixed variables and Δ AIC below 6. [§]Model that during the model simplification process had the minimum AIC.

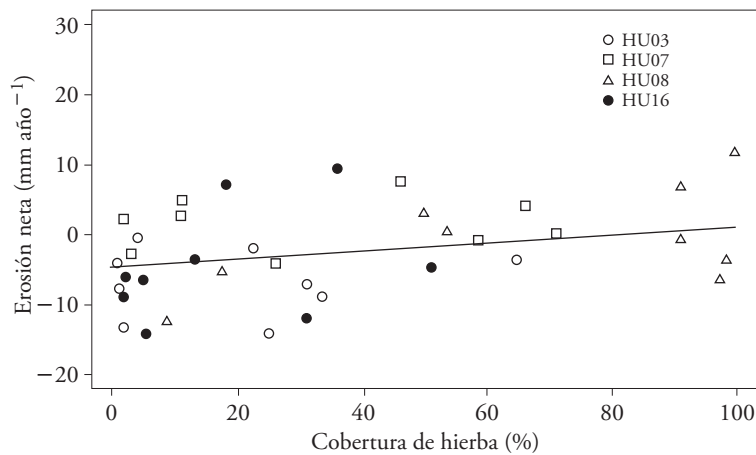


Figura 4. Efecto de la cobertura de hierba sobre la erosión neta. La línea continua indica los valores estimados a partir del modelo lineal mixto. Cada punto representa la erosión neta media (en negativo) de siete estacas por parcela.

Figure 4. Effect of weed cover on net erosion. The continuous line indicates values estimated from the mixed linear model. Each dot represents mean net erosion (negative) of seven stakes per plot.

cobertura de dosel tuvo una influencia mayor pero opuesta a la cobertura herbácea (Figura 5); a mayor cobertura de dosel hubo mayor erosión (pendiente de -2.28 ; con $IC_{95\%} -0.28-0.49$), debido en parte al incremento del efecto erosivo por la lluvia que se escurre sobre las hojas de los árboles (Nanko *et al.*, 2004) y por la disminución de la cobertura de hierbas intolerantes a la sombra.

El efecto combinado de las coberturas arbórea, arbustiva, herbácea y de hojarasca sobre la variación de

some cases even sedimentation (Figure 4), although herbaceous plant cover was a fairly poor explanatory variable (slope 0.06; $CI_{95\%} -0.01-0.12$). Canopy cover had greater influence but opposite to that of weed cover (Figure 5), with more tree cover leading to more erosion (slope -2.28 ; with $CI_{95\%} -0.28-0.49$), perhaps due in part to the increase in the erosive effect of the larger drops that run off leaves versus those falling as precipitation (Nanko *et al.*, 2004) and the negative effect of shade on weed cover.

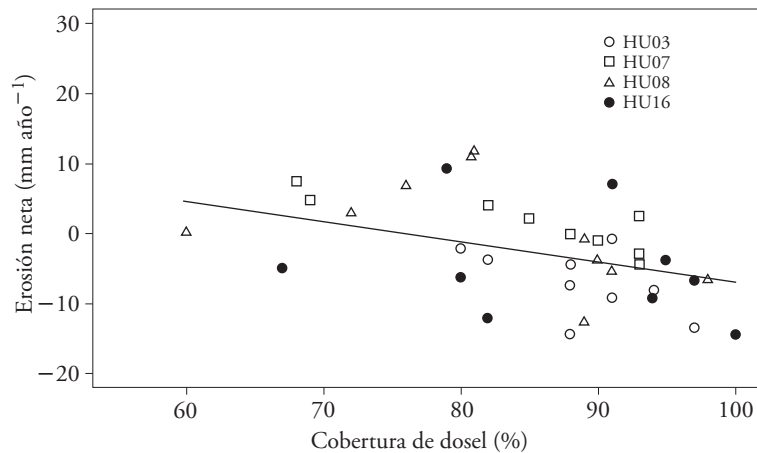


Figura 5. Efecto de la sombra sobre la erosión neta. La línea continua indica los valores estimados a partir del modelo lineal mixto. Cada punto representa la erosión neta media (en negativo) de siete estacas por parcela.

Figure 5. Effect of shade on net erosion. The continuous line indicates values estimated from the mixed linear model. Each dot represents mean net erosion (negative) of seven stakes per plot.

la pérdida de suelo es complejo. En una finca de café bajo sombra del centro-norte del estado de Veracruz, Pérez-Nieto *et al.* (2012) determinaron que sólo las coberturas arbustiva y de hojarasca tuvieron efecto reductor de la pérdida del suelo. Su análisis se hizo por tipo de cobertura individual y la pérdida de suelo se midió en microcuencas sin réplicas, con un muestreador de escurrimiento superficial. Sus resultados difieren del modelo de erosión obtenido en nuestro estudio, el cual mostró que sólo el efecto combinado de las coberturas arbórea y herbácea influyó en la erosión. Dicho modelo indica que una cobertura de dosel arbóreo $\leq 60\%$ no ocasionaría erosión aún en ausencia de un estrato herbáceo. En tal caso, controlar las arvenses con chapeo o eliminarla con herbicida, no tendría efecto en la generación de la erosión. Además, dada una cobertura de dosel de 80% , un aumento de 40% a 50% de la cobertura de hierba reduciría la erosión cuatro veces (de 0.76 mm año^{-1} a 0.18 mm año^{-1}) y cuando esta última es $\geq 60\%$, ya no se produciría erosión. En estos dos escenarios, convendría mantener o aumentar la cobertura de hierba.

El análisis lineal mixto no detectó diferencias estadísticas significativas entre los valores de la erosión neta y los tratamientos de herbicida, chapeo y testigo, por lo cual fue innecesario realizar más pruebas de medias, ya que este factor no contribuyó en la explicación de la variabilidad de la erosión neta. En particular, el tratamiento con herbicida no tuvo un efecto concluyente sobre la erosión neta al cabo de un año de mediciones. Después de la aplicación en julio, la hierba se secó en una semana, y en septiembre seguía desprendida en forma de rastrojo. En diciembre comenzó a expandirse de nuevo y en marzo de 2013,

The combined effect of tree, bush, herbaceous plant, and litter cover on variation in soil loss is complex. On a shade coffee farm in north-central state of Veracruz, Pérez-Nieto *et al.* (2012) determined that only bush and litter cover had a reducing effect on soil loss. Their analysis was done using individual cover types, and soil loss was measured in microcatchments with a surface runoff sampler and no replication. Their results differ from the erosion model obtained in our study, which showed that only the combined effect of tree and weed cover had an influence on erosion. Our model indicates that a tree canopy cover of $\leq 60\%$ would not cause erosion even when the herbaceous plant stratum is absent. In this case, it would make no difference in erosion whether weed control was done with chapeos or with herbicide. However, under an 80% canopy a $40\text{-}50\%$ increase in weed cover would reduce erosion four fold (from 0.76 mm year^{-1} to 0.18 mm year^{-1}), and with 60% cover erosion should stop altogether. Under these two scenarios, it would be recommendable to maintain or increase weed cover.

The mixed linear analysis did not detect statistically significant differences between net erosion values and the herbicide, chapeo, or control treatments. Thus, conducting more tests of means was not necessary since this factor did not help to explain the variability in net erosion. The herbicide treatment, in particular, had no conclusive effect on net erosion after one year of measurement. After application in July, weeds died within a week with plants continuing to lose leaves in September. By December they had begun to grow again, and in March 2013, just before removing the stakes, weed cover was on average 18% in herbicide treated plots,

poco antes de retirar las estacas, las coberturas fueron en promedio 18 % en las parcelas tratadas con herbicida, 45 % en el chapeo y 42 % en el testigo. Al final del año de mediciones y comparado con el testigo, la aplicación de herbicida solo produjo un incremento de la erosión neta en las parcelas de HU08 (de 2.5 mm a -5.3 mm). En las otras fincas hubo una disminución (HU07 y HU16) e incluso, sedimentación (HU03) (Cuadro 2). En esta última, el desplazamiento de las partículas y agregados por acción de la escorrentía, pudo ser frenada por la parte aérea muerta de las arvenses esparcida en la superficie de la parcela, favoreciendo así la sedimentación. Estas conclusiones son similares a las reportadas por Carvalho *et al.* (2007) para cafetales al sol con diferentes tratamientos de la cobertura herbácea. Los sitios tratados con herbicida tuvieron valores de erosión intermedios entre los de otros manejos de la cobertura herbácea y del suelo desnudo, debido al efecto protector del rastrojo en la superficie del suelo. En un cafetal de sombra de Costa Rica, se necesitaron nueve aplicaciones de glifosato (Roundup 35,6L) en dos años, para que la pérdida de suelo alcanzara $0.33 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Gómez, 2005), por lo cual repetidas aplicaciones durante el año también podrían aumentar las tasas de erosión en las fincas de Veracruz más allá que las reportadas acá.

Los resultados obtenidos en nuestro estudio sólo son válidos para las condiciones ambientales y de manejo de las fincas estudiadas: precipitación anual entre 1750 y 1850 mm, factor K de erodabilidad del suelo entre 0.05 y 0.10, factor LS de pendiente entre 9.04 y 11.41, cobertura de dosel >60 %, densidad de cafetos entre 1900 y 3300 ha^{-1} y cobertura de hojarasca ≥ 90 %. Aun así, el estudio contribuyó al conocimiento de la erosión en cafetales de sombra multi-estratificada, al mostrar que varía en el espacio debido a los procesos erosivos y de sedimentación, y a la influencia del manejo de la cubierta vegetal a ras del suelo. Sin embargo, para mejorar el entendimiento de las causas y magnitud de la erosión con la técnica de las estacas, se requeriría ampliar la investigación a un período de tres a cinco años, ya que la erosión del suelo varía también en el tiempo (Afandi *et al.*, 2002; Verbist *et al.*, 2010), y además incluir un número mayor de fincas y parcelas para abarcar una amplia variación ambiental, porque la sensibilidad litológica y edáfica de un sitio a la erosión es aún más importante que la edad del cafetal o la presencia de

45 % in chapeo plots, and 42 % in the control plots. By the end of the year, and compared with the controls, the herbicide application had produced an increase in net erosion only in HU08 plots (from 2.5 mm to -5.3 mm). On the other farms, there was a decrease in erosion (HU07 and HU16) and even some sedimentation (HU03) (Table 2). At this latter site, transport of particles and aggregates by runoff was stopped by dead shoots of weeds scattered over the surface of the plot, thus favoring sedimentation. These conclusions are similar to those reported by Carvalho *et al.* (2007) for sun coffee plantations with different treatments of herbaceous plant cover. The sites treated with herbicide had intermediate erosion values, compared to those of weed cover management and bare soil, due to the protective effect of the dead plants on the soil surface. In a shade plantation in Costa Rica, it took nine applications of glyphosate (Roundup 35,6L) over two years for soil loss to reach $0.33 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ (Gómez, 2005). Thus, repeated applications of herbicides during the same year on farms in Veracruz should also increase erosion rates beyond those observed in our study.

The results obtained in our study are valid only for the environmental and management conditions of the farms studied: annual precipitation of 1750 to 1850 mm, soil erodibility K factor 0.05 to 0.10, slope LS factor 9.04 to 11.41, canopy cover >60 %, coffee plant density 1900 to 3300 ha^{-1} , and litter cover ≥ 90 %. Nevertheless, the study contributes to knowledge of erosion in multi-stratified shade coffee plantations by demonstrating spatial variation in erosion is due to erosive and sedimentation processes and the influence of management of plant cover at the soil level. However, improving our understanding of the causes and magnitude of erosion with the stake technique would require extending the study to a period of three to five years since soil erosion also varies over time (Afandi *et al.*, 2002; Verbist *et al.*, 2010). Additionally, a larger number of farms and plots should be included to encompass broader environmental variation since the lithological and edaphic sensitivity of a site is even more important to erosion than the age of the coffee plantation or the presence of shade trees (Verbist *et al.*, 2010). We should also note that measuring soil erosion with stakes is a procedure recommended at the plot scale when laminar processes and diffuse runoff dominate. However, this method may not be adequate under

árboles de sombra (Verbist *et al.*, 2010). También es necesario tomar en cuenta que medir la erosión del suelo con estacas es un procedimiento recomendado a escala de parcela cuando dominan procesos laminares y de escorrentía difusa, pero su utilidad se reduce cuando se manifiestan procesos de erosión en surcos o cuando se quiere extrapolar las mediciones a escala de cuenca donde ocurren procesos de erosión en cárcavas y deslizamientos de tierra. En todos los casos, el manejo de la cubierta vegetal es el medio más simple para controlar la erosión en cafetales de sombra sobre pendientes, por lo cual es recomendable incorporar el manejo integral de arvenses (Quiroz-Marín e Hincapie-Gómez, 2007) y la selección de especies arbóreas, arbustivas y herbáceas (Sidle *et al.*, 2006).

CONCLUSIONES

Este estudio sobre la erosión del suelo, medida en parcelas de café de sombra con la técnica de estacas, mostró que solo las coberturas herbácea y arbórea explicaron la variación de la erosión neta, de acuerdo con el modelo lineal mixto. El efecto combinado de ambas coberturas redujo la tasa de erosión al aumentar la herbácea y disminuir la arbórea. Las coberturas arbustiva y de hojarasca no tuvieron un efecto significativo. La erosión neta promedio en la parcela testigo, con corte manual tradicional de arvenses, fue superior a la esperada en este tipo de agroecosistema. La aplicación de herbicida produjo un incremento de la erosión en una finca, pero no se pudo concluir que su efecto, al igual que el del chapeo, genere más erosión que el testigo. Además, los procesos de erosión y de sedimentación son comunes en cafetales de sombra.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el otorgamiento de la beca (261450) a Ana Mólgora y por el financiamiento parcial de la investigación a través del proyecto FORDECYT No. 139398. A Carlos Domínguez, Javier Tolome, Mara Santoyo y Jatziri López por el apoyo técnico en campo. Nuestro reconocimiento a los productores y sus familias por permitir el acceso a las fincas y por el amable trato.

LITERATURA CITADA

Afandi M., T. K., B. Rosadi, M. Utomo, M. Senge, T. Adachi, and Y. Oki. 2002. Erosion under coffee trees with different

conditions of rill erosion or when extrapolating measurements to the watershed scale where erosion in gullies and landslides occur. In any event, management of plant cover is the simplest means of controlling erosion in shade coffee plantations on slopes. Therefore, integrated weed management (Quiroz-Marín and Hincapie-Gómez, 2007), as well as the careful selection of tree, bush and herbaceous species (Sidle *et al.*, 2006), is recommended.

CONCLUSIONS

This study on soil erosion measured in shade coffee plots using the stake technique showed that only herbaceous plant and tree covers explained variation in net erosion, according to mixed linear models. The combined effect of the two covers reduced the rate of erosion when herbaceous plant cover increased and tree cover decreased. Coffee bush and litterfall cover had no significant effect. Average net erosion in control plots with traditional manual weed cutting was higher than expected for this type of agroecosystem. Application of herbicide produced an increase in erosion on one farm, but we cannot conclude that this management practice, or that of chapeo, generated more erosion than the controls. Besides, the processes of erosion and sedimentation are common in shade coffee plantations.

—End of the English version—



- weed managements in humid tropical hilly area of Lampung, South Sumatra, Indonesia. *J. Jap. Soc. Soil Physics* 91: 3-14.
- Afandi M., T. K., B. Rosadi, M. Utomo, M. Senge, T. Adachi, and Y. Oki. 2003. An evaluation of coffee crop factor under different weed managements using USLE method in hilly humid tropical area of Lampung, South Sumatra, Indonesia. *J. Jap. Soc. Soil Physics* 93: 21-33.
- Arellano G., R. 2000. Pérdida de suelo y nutrientes en agroecosistemas de café en la subcuenca del río Castán, Trujillo-Venezuela. *Forest* 44: 79-86.
- Ataroff, M., and M. Monasterio. 1997. Soil erosion under different management of coffee plantations in the Venezuelan Andes. *Soil Technol.* 11: 95-108.
- Boix-Fayos C., M. Martínez-Mena, E. Arnau-Rosalén, A. Calvo-Cases, V. Castillo, and J. Albaladejo. 2006. Measuring soil erosion by field plots: Understanding the sources of variation. *Earth Sci. Rev.* 78: 267-285.
- Carvalho, R., M. L. Naves S., J. C. Avanzi, N. Curi, and F. Silva de Souza. 2007. Water erosion in red latosol under diverse coffee plant management systems at South of Minas Gerais State, Brazil. *Ciênc. Agrotec., Lavras* 31: 1679-1687.

- Cayuela, L. 2012. Modelos lineales mixtos (LMM) y modelos lineales generalizados mixtos (GLMM) en R. Universidad Rey Juan Carlos. España. 65 p.
- Crawley, M. J. 2007. The R book. John Wiley and Sons. 950 p.
- Folk, R. L. 1951. A comparison chart for visual percentage estimation. *J. Sedim. Res.* 21: 32-33.
- Geissert, D., y A. Ibañez. 2008. Calidad y ambiente físico-químico de los suelos. *In: Manson R., V. Hernández-Ortiz, S. Gallina, y K. Mehlreter (eds). Agrosistemas Cafetaleros de Veracruz: Biodiversidad, Manejo y Conservación. Cap. 15. Instituto de Ecología, A.C. e Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), México. pp: 213-221.*
- Gómez G., R. 2005. Efecto del control de malezas con paraquat y glifosato sobre la erosión y pérdida de nutrientes del suelo en cafetos. *Agron. Mesoam.* 16: 77-87.
- Gómez-Aristizábal A., y H. Rivera-Posada. 1993. La conservación de los suelos y la sostenibilidad de la productividad en la zona cafetera. *Avances Técnicos* 190, Cenicafé, Colombia, 8 p.
- Hernández-Martínez, G., R. H. Manson, and A. Contreras H. 2009. Quantitative classification of coffee agroecosystems spanning a range of production intensities in central Veracruz, Mexico. *Agric. Ecosys. Environ.* 134: 89-98.
- Hudson, N. W. 1993. Field measurement of soil erosion and runoff. *FAO Soils Bulletin* No. 68, FAO, Rome. 153 p.
- Marín C., y G. Desir. 2003. Comparación entre distintas técnicas para la determinación de la pérdida de suelo. *Bardenas Reales (Navarra). Edafología* 10: 215-225.
- Manson, R.H., A. Contreras H., y F. López-Ibarra. 2008. Estudios de la biodiversidad en cafetales. *In: Manson R., V. Hernández-Ortiz, S. Gallina, y K. Mehlreter (eds). Agrosistemas Cafetaleros de Veracruz: Biodiversidad, Manejo y Conservación. Cap. 1. Instituto de Ecología, A.C. e Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). México. pp: 1-14.*
- Moguel, P., y Toledo, V. M. 2004. Conservar produciendo: biodiversidad, café orgánico jardines productivos. *Biodiversitas* 55: 1-7.
- Moguel, P., y Toledo, V. M. 1999. Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. *Conservation Biol.* 1: 11-21.
- Nanko, K., N. Hotta, and M. Suzuki. 2004. Assessing raindrop impact energy at the forest floor in a mature Japanese cypress plantation using continuous raindrop-sizing instruments. *J. For. Res.* 9: 157-164.
- Pérez-Nieto, J., E. Valdés-Velarde, y V. M. Ordaz-Chaparro. 2012. Cobertura vegetal y erosión del suelo en sistemas agroforestales de café bajo sombra. *Terra Latinoam.* 30: 249-259.
- Pérez-Nieto, J., E. Valdés-Velarde, M. E. Hernández-San Román, y V. Ordaz-Chaparro. 2005. Lluvia, escurrimiento superficial y erosión del suelo en sistemas agroforestales de café bajo sombra. *Agrociencia* 39: 409-418.
- Pérez-Portilla, E., y D. Geissert-Kientz. 2006. Zonificación agroecológica de sistemas agroforestales: el caso café (*Coffea arabica* L.)-palma camedor (*Chamaedorea elegans* Mart.). *Interciencia* 31: 556-562.
- Pimentel, D., and N. Kounang. 1998. Ecology of soil erosion in ecosystems. *Ecosystems* 1: 416-426.
- Pizarro, R., y H. Cuitiño. 2002. Método de evaluación de la erosión hídrica superficial en suelos desnudos en Chile. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales. Actas de la I Reunión del Grupo de trabajo de Hidrología Forestal. Madrid, España. pp: 165-170.*
- Ploey, de, J. and D. Gabriels. 1980. Measuring soil loss and experimental studies. *In: Kirkby M. J., and R. P. C. Morgan (eds). Soil erosion. Wiley-Interscience Public., John Wiley and Sons. pp: 63-108.*
- Quiroz-Marín, T., y E. Hincapié-Gómez. 2007. Pérdidas de suelo por erosión en sistemas de producción de café con cultivos intercalados. *Cenicafé* 58: 227-235.
- Richards, S. A. 2015. Likelihood and model selection. *In: Fox, G. A., S. Negrete-Yankelevich, V. J. Sosa (eds). Ecological Statistics: Contemporary Theory and Application. Oxford University Press. pp: 58-80.*
- Rosas-Arellano, J., E. Escamilla-Prado, y O. Rosado-Ruiz. 2008. Relación de los nutrimentos del suelo con las características físicas y sensoriales del café orgánico. *Terra Latinoam.* 26: 376-376.
- Römzens, M. J. M., R. A. Young, J. W. A. Poesen, D. K. McCool, S. A. El-Swaify, and J. M. Bradford. 1997. Soil Erodibility factor (K). *In: Renard, K. G., G. R. Foster, G. A. Weesies, D. K. McCool, D. C. Yoder (coord.). Predicting Soil Erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss equation (RUSLE). Chap. 3. Agriculture Handbook No. 703. U.S. Department of Agriculture, USA. pp: 65-99.*
- SIAP-SAGARPA. 2015. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/> (Consultado: Julio 2015).
- Sidle, R., A. D. Ziegler, J. N. Negishi, A. R. Nik, R. Siew, and F. Turkelboom. 2006. Erosion processes in steep terrain—Truths, myths, and uncertainties related to forest management in Southeast Asia. *Forest Ecol. Manage.* 224: 199-225.
- Soto, M., y E. García. 1989. Atlas Climático del Estado de Veracruz. Instituto de Ecología A. C., México. 125 p.
- Soil Survey Division Staff. 1993. Soil Survey Manual. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture. Handbook No. 18. Chap. 6. Washington, D.C. 34 p.
- Verbist, B., J. Poesen, M. van Noordwijk, Widiyanto, D. Suprayogo, F. Agus, and J. Deckers. 2010. Factors affecting soil loss at plot scale and sediment yield at catchment scale in a tropical volcanic agroforestry landscape. *Catena* 80: 34-46.
- Young, A. 1989. Agroforestry for soil conservation. *ICRAF Science and Practice of Agroforestry* No. 4. CAB International, UK. 276 p.