



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


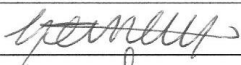

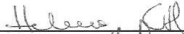
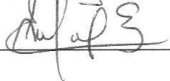
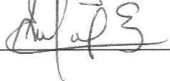
TESIS QUE PRESENTA LA BIÓL. ANA MÓLGORA TAPIA PARA OBTENER EL
GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

XALAPA, VERACRUZ, MÉXICO (2013)



Aprobación final del documento de tesis de grado:

“Efecto del manejo de la cobertura vegetal sobre la erosión hídrica en cafetales de sombra del centro de Veracruz”


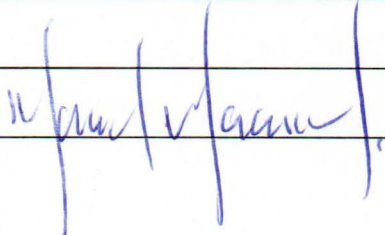
	Nombre	Firma
Director	Dr. Robert Hunter Manson (I)	
Codirector	Dr. Daniel Robert Geissert Kientz (I)	
Comité Tutorial	Dra. Simoneta Negrete Yankelevich (I)	
	Dra. Helena Cotler Avalos (E)	
Jurado	Dr. Adolfo Campos Cascaredo (I)	
	Dr. José Manuel Maass Moreno (E)	

DECLARACIÓN



Aprobación final del documento de tesis de grado:

“Efecto del manejo de la cobertura vegetal sobre la erosión
hídrica en cafetales de sombra del centro de Veracruz”

	Nombre	Firma
Director	Dr. Robert Hunter Manson (I)	
Codirector	Dr. Daniel Robert Geissert Kientz (I)	
Comité Tutorial	Dra. Simoneta Negrete Yankelevich (I)	
	Dra. Helena Cotler Avalos (E)	
Jurado	Dr. Adolfo Campos Cascaredo (I)	
	Dr. José Manuel Maass Moreno (E)	

DECLARACIÓN


Excepto cuando es explícitamente indicado en el texto, el trabajo de investigación contenido en esta tesis fue efectuado por Ana Mólgora Tapia como estudiante de la Maestría en Ciencias entre septiembre de 2011 y diciembre del 2013, bajo la supervisión del Dr. Robert H. Manson y del Dr. Daniel R. Geissert Kientz.


Las investigaciones reportadas en esta tesis no han sido utilizadas anteriormente para obtener otros grados académicos, ni serán utilizadas para tales fines en el futuro.

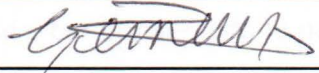
Candidato: Ana Mólgora Tapia

Director de tesis: Robert H. Manson

Codirector de tesis: Daniel R. Geissert Kientz







RECONOCIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo mediante la beca de manutención (261450).

Parte de los fondos requeridos para la realización de este trabajo provinieron del proyecto FORDECYT No. 139398. Mi reconocimiento a quienes impulsaron este proyecto tan importante para la región cafetalera de Veracruz.

A mi comité tutorial, en especial a mis codirectores, los doctores Daniel Geissert y Robert Manson por sus consejos y gran dedicación durante la realización y revisión durante el proceso de mi trabajo. A la Dra. Simoneta, a la Dra. Helena y a los miembros de jurado, el Dr. Adolfo Campos y el Dr. Manuel Maass, por sus observaciones y valiosos comentarios.

A quienes me ayudaron en el trabajo de campo, en especial a Alex (Carlos Domínguez), Javier Tolome, Mara, Daniel Geissert y Jatxiri.

A los que me ayudaron en estadística: Roger, Simoneta, Sherpa y Chava.

A los productores de café y sus familias que me permitieron realizar mi trabajo en sus fincas y me recibieron de la manera más amable: don Apolinar Zilch, Esmeralda y su esposo Jesús, José Enrique Romero, don Gaspar Munguía, señor Jorge Müller, Roberto Tress.

Al Instituto de Ecología A. C. y a todos los que le dan vida, por brindar todo lo necesario para llevar a cabo mi maestría de forma muy satisfactoria.

Agradecimientos

A los profesores dedicados que de distintas maneras dejan sus enseñanzas y contagian su entusiasmo. A Jesús Moreno, Roberto Maciel, Javier Reyes, Elba Castro, Miguel Magaña, Christina Siebe, Lorenzo Vázquez y Alberto Gómez Tagle, por mencionar a algunos.

A mis compañeros y amigos con los que compartí esta experiencia: Sherpa, Pierre, Gaby, Itzel, Lili, Beto, Mariana, Mara, Ronny, Juanfer, Sandra, Liliana, Paola, Fredy, Chava, Rosa, Brenda, Sergio, Arturo, John, Manuel, Octavio y a la vecindad Azueta.

A mis amigos de siempre que a pesar de la distancia estuvieron conmigo. Gracias Iréri, Natalia, Mariana, Cynthia, Anna, Memo, Julia.

DEDICATORIA

A los cafetaleros.

A mi familia y a Emmanuel.

A mis amigos.

ÍNDICE

RESUMEN	10
INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 Problemática de la erosión.....	11
1.2 Proceso de erosión.....	13
1.3 Erosión en cafetales de sombra en Veracruz.....	16
1.4 Métodos comunes de medición de la erosión.....	21
1.5 Medición de la erosión con estacas	22
OBJETIVOS E HIPÓTESIS	25
2.1 Objetivo general	25
2.2 Objetivos específicos.....	25
2.3 Hipótesis	25
METODOLOGÍA.....	26
3.1 Área de estudio.....	26
3.2 Sitios de estudio.....	27
3.3 Parcelas de medición de la erosión por el método de estacas	30
3.4 Tratamientos	31
3.5 Instalación de estacas	32
3.6 Mediciones	33
ANÁLISIS DE DATOS	37
4.1 Tasas de erosión (Objetivo 1).....	37
4.2 Selección de variable de respuesta	38
4.3 Efecto del manejo de vegetación sobre la erosión (Objetivos 2 a 4).....	39
RESULTADOS	40

5.1 Tasas de erosión (Objetivo 1).....	41
5.3 Efecto del manejo de hierba sobre la erosión (Objetivo 2)	44
5.3 Efecto de la cobertura al ras del suelo (Objetivo 3)	48
5.4 Efecto de cafetos sobre la erosión (Objetivo 4).....	50
5.5 Efecto de la cobertura de dosel sobre la erosión (Objetivo 4).....	51
DISCUSIÓN.....	53
6.1 Tasas de erosión	53
6.2 Efecto de los tratamientos	55
6.3 Efecto de la cobertura al ras del suelo	56
6.4 Efecto de la cobertura arbórea.....	56
6.5 Efecto de la densidad de cafetos sobre la erosión	57
6.6 Método de medición con estacas	58
CONCLUSIONES.....	59
BIBLIOGRAFÍA.....	62
ANEXOS.....	72

Lista de cuadros

Cuadro 1. Clasificación del grado de erosión por intervalos de pérdida de suelo	11
Cuadro 2. Tasa de erosión hídrica medida en diferentes sistemas cafetaleros	20
Cuadro 3. Ventajas y desventajas de los métodos de medición y estimadores más comunes de la erosión laminar y en surcos	22
Cuadro 4. Resumen de estudios de erosión que utilizaron el método de estacas.....	24
Cuadro 5. Características geográficas, topográficas, edáficas y de manejo de los sitios de estudio	29

Cuadro 6. Características de ladera y árboles en los bloques de cada finca	31
Cuadro 7. Media y error estándar de las tasas de erosión neta anual en las parcelas control, según el sitio de la estaca donde se tomó la medición	42
Cuadro 8. Modelo de la erosión neta anual de los cafetales, explicada por diferentes estratos vegetales.....	44

Lista de figuras

Figura 1. Ubicación de los sitios de estudio en la región cafetalera de Huatusco.	28
Figura 2. Tratamientos para el control de la hierba.....	32
Figura 3. Instalación de estacas e instalación de banderín para facilitar su localización	33
Figura 4. Mediciones realizadas en cada estaca: medición en parte alta y en parte baja	34
Figura 5. Toma de medición de la erosión con vernier en las estacas para el caso en que presenten erosión o sedimentación	35
Figura 6. Estimador visual del porcentaje de cobertura del área	36
Figura 7. Precipitación mensual durante el periodo del estudio y comparación con el registro histórico.....	40
Figura 8. Intensidad de todos los eventos de precipitación (mm/día) que se presentaron en el periodo de estudio	41
Figura 9. Variación en la cobertura de hierba según el tratamiento.....	45
Figura 10. Efecto del herbicida sobre la hierba.....	45
Figura 11. Cobertura de hierba en parcelas “control” (media y desviación estándar), en cada finca durante el periodo de estudio	46
Figura 12. Cobertura de hierba en parcelas con el tratamiento de chapeo (media y desviación estándar) en cada finca durante el periodo de estudio.....	46

Figura 13. Cobertura de hierba en parcelas con el tratamiento de herbicida (media y desviación estándar) en cada finca durante el periodo de estudio.....	47
Figura 14. Erosión neta promedio, por finca, para las parcelas control registrada en los meses de julio, septiembre y abril.....	47
Figura 15. Erosión neta promedio, por finca, para el tratamiento de chapeo, registrada en los meses de julio, septiembre y abril	48
Figura 16. Erosión neta promedio, por finca, registrada para el tratamiento de herbicida, en los meses de julio, septiembre y abril	48
Figura 17. Efecto de la cobertura de hierba sobre la erosión neta	49
Figura 18. Cobertura de hierba en cada finca durante el periodo de estudio	49
Figura 19. Cobertura de hojarasca en cada finca durante el periodo de estudio	50
Figura 20. Área con suelo desnudo observada en cada finca durante el periodo de estudio	50
Figura 21. Diagrama de cajas y bigotes con el número de cafetos, en las parcelas de medición, de cada finca.....	51
Figura 22. Efecto de la sombra sobre la erosión neta	52
Figura 23. Diagrama de cajas y bigotes con la sombra de cada finca observada en julio	52
Figura 24. Diagrama de cajas y bigotes con la sombra de cada finca observada en marzo	53

Lista de anexos

Anexo 1. Forma de la ladera, las flechas muestran el flujo de agua sobre la superficie.....	72
Anexo 2. Distribución de las residuales del modelo lineal mixto como una muestra de homocedasticidad	72
Anexo 3. Script de R para la realización del modelo lineal mixto	73

RESUMEN

El cultivo más importante en la zona montañosa del centro del estado de Veracruz es el café de sombra. Este agroecosistema está sujeto a distintas formas de manejo, algunas de las cuales podrían tener consecuencias negativas para las tasas de erosión del suelo debido a las pendientes pronunciadas y las altas precipitaciones que caracterizan esta zona. La erosión hídrica en los cafetales depende en gran parte del manejo de los estratos vegetales, herbáceo, arbustivo y arbóreo. Se hizo un estudio de las tasas de erosión del suelo policultivos de café, utilizando el método de medición con estacas. Los objetivos del estudio fueron: 1) medir la tasa de erosión en cafetales de sombra y su variación dentro y entre sitios, 2) evaluar el efecto que tienen el chapeo y el uso de herbicida en el proceso de erosión, 3) conocer de qué manera influye la cobertura de hierba y de hojarasca sobre la erosión y 4) analizar si la cobertura de dosel de los árboles de sombra y la densidad de cafetos afectan dicho proceso. Se presentan resultados de 4 fincas con una alta variación inter e intra-sitios, con una tasa de erosión promedio de $33.5 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, la cual es elevada en comparación con otros datos reportados en cafetales. Se evaluó el efecto de las variables tratamiento (chapeo y herbicida), coberturas de hierba, hojarasca, suelo desnudo, dosel y número de cafetos, mediante un modelo lineal mixto, el cual indicó que no hubo efectos significativos del tipo de manejo de la hierba por chapeo o herbicida sobre la tasa de erosión en el periodo de un año. En cuanto a las coberturas al ras del suelo (hierba y hojarasca), la de hierba fue la única que tuvo una relación con la tasa de erosión ($F_{1, 22} = 6.462, p = 0.02$). Por otro lado, se encontró que a mayor sombra, se presentó una mayor erosión ($F_{1, 22} = 7.742, p = 0.01$), posiblemente porque la cobertura está correlacionada negativamente con la cobertura de la hierba ($Rho = -0.395, p = 0.017$). Se concluyó que no todos los cafetales de sombra son igual de eficientes en la conservación del suelo y que es posible controlar la erosión mediante un manejo adecuado de las coberturas arbóreas y herbáceas, promoviendo una cobertura de hierba adaptada a los altos niveles de sombra de los cafetales. Dado el alto nivel de variación observado en este sistema, los resultados obtenidos son preliminares, por lo que se requieren estudios con un mayor número de réplicas, tanto en el nivel estaca, como de bloque y sitio con el fin de tener datos más representativos. El método de estacas es útil y práctico para este tipo de estudios, sin embargo falta estandarizarlo, en términos de cómo realizar la medición, elegir el tamaño de las parcelas de medición y el tiempo óptimo de medición.

INTRODUCCIÓN

1.1 Problemática de la erosión

La erosión es un proceso de desgaste que ocurre naturalmente sobre la superficie terrestre y que incluye la remoción de suelo, sedimentos, regolita y rocas. A nivel paisaje, la erosión contribuye en la formación de lomas y valles, desprende los sedimentos y los transporta ladera abajo mediante la fuerza de gravedad sumada a la del viento, del agua o del hielo, al mismo tiempo que es la principal responsable de la degradación del suelo (Pidwirny, 2006; Garcia-Chevesich, 2009). La erosión ocasionada por el efecto de la acción del agua es llamada erosión hídrica. Se estima que las altas tasas de erosión afectan alrededor de 1,100 millones de hectáreas en el mundo, de las cuales 225 millones ya presentan daños irreversibles (Oldeman, 1994). La erosión puede ser ocasionada o acelerada por las actividades antropogénicas, tales como la deforestación, las técnicas de cultivo inadecuadas, la construcción de canales y de caminos (Viles, 1990; Juo y Franzluebbbers, 2003; Pizarro *et al.*, 2010). El 56% del área mundial afectada por degradación inducida por el hombre, se debe a la aceleración de la erosión hídrica, siendo las principales causas: la deforestación (43%), el pastoreo extensivo (29%) y el mal manejo agrícola (24%; Oldeman, 1994). La formación de los suelos a partir de la roca y minerales requiere de miles a millones de años (Juo y Franzluebbbers, 2003), mientras que la erosión sucede a un ritmo mucho mayor, a tal grado que la tasa de pérdida de suelo provocada por seres humanos puede ser de 13 a 40 veces mayor que su tasa de formación (Pimentel y Kounang, 1998; Durán-Zuazo y Rodríguez-Pleguezuelo, 2008).

La clasificación de los rangos de pérdida de suelo por erosión es variable según los autores, pero la escala más referida en México es probablemente la que se presenta en evaluaciones realizadas por la SEMARNAT y Colegio de Postgraduados (2003, Cuadro 1).

Grado de erosión	Pérdida de suelo (t ha⁻¹ año⁻¹)
Nula	0-5
Ligera	5-10
Moderada	10-50
Alta	50-200
Muy alta	>200

Cuadro 1. Clasificación del grado de erosión por intervalos de pérdida de suelo.

Las principales consecuencias de la erosión *in situ* a corto plazo son la reducción del espesor de suelo y la pérdida de materia orgánica y del estrato más rico en nutrientes, disminuyendo de esta manera el potencial productivo del suelo (Lal, 1998). Por otro lado, la pérdida de este estrato implica la modificación de algunas de sus propiedades como la textura, siendo las partículas más finas, arcillas y limos, las primeras en ser arrastradas. Al movilizarse las partículas de suelo, se tapan los poros, reduciendo de esta manera la aireación, la capacidad de infiltración y de retención de humedad, a la vez que se incrementa la densidad aparente. Conforme estas modificaciones son más severas, se restringe la diversidad biológica, afectando así a otros procesos como el reciclaje de nutrientes, y de esta manera, el equilibrio del ecosistema (Pimentel y Kounang, 1998; Durán-Zuazo y Rodríguez-Pleguezuelo, 2008).

Las consecuencias *ex situ* suelen ser más difíciles de observar que las *in situ*. Algunos terrenos que se ubican cuenca abajo pueden ser beneficiados debido a la acumulación de suelos ricos en nutrientes mientras que otros terrenos sufren deslaves. Uno de los efectos más importantes de la erosión es el aporte de sedimentos en los cuerpos de agua, que afecta la calidad del agua teniendo consecuencias sobre los ecosistemas acuáticos, y llevando al azolvamiento de ríos, lagos y presas, lo cual reduce la vida útil de sus reservorios de agua y aumenta los costos de mantenimiento. Además, la escorrentía superficial se incrementa, ya que los suelos moderadamente erosionados tienen menor capacidad de infiltración. Se ha reportado que los suelos moderadamente erosionados absorben entre 10 y 300 milímetros menos agua de lluvia por hectárea y por año, a comparación de un suelo no erosionado (Pimentel y Kounang 1998). En consecuencia, la recarga de acuíferos disminuye y se genera un mayor riesgo de inundaciones debido tanto al azolvamiento de los cuerpos de agua como a la disminución de la capacidad de infiltración de los suelos erosionados (Toy *et al.*, 2002).

La erosión es considerada como uno de los principales problemas ambientales a nivel mundial ya que tiene repercusiones graves sobre la economía, el ambiente y la seguridad alimentaria (Eswaran *et al.*, 2001). Se estima que en el mundo se pierden cerca de 75 billones de toneladas de suelo anuales debido a la erosión, lo cual cuesta alrededor de \$400 billones de dólares por año, considerando las repercusiones agrícolas (Pimentel y Kounang, 1998). Si la erosión mantuviera

este ritmo, la producción mundial de alimentos podría disminuir hasta 16.5% para el año 2020 (Eswaran *et al.*, 2001). En los Estados Unidos, el costo anual estimado de la erosión es de alrededor de \$247 dólares por hectárea de área cultivada o de pastizal (Eswaran *et al.*, 2001).

En México, se reportó para el año 2003 que la erosión hídrica afectaba cerca del 12% del territorio (23.6 millones de hectáreas), donde el 72.5% del área afectada correspondía a zonas de agricultura, ganadería y plantaciones forestales (SEMARNAT, 2003). Cotler *et al.* (2011) realizaron una valoración económica de la pérdida de los suelos agrícolas en México. Considerando únicamente a dos de los servicios ambientales que brinda el suelo *in situ* (mantenimiento de la productividad y costo de remplazo de nutrientes mediante el uso de fertilizantes), estimaron que la pérdida de un centímetro de suelo por hectárea (entre 0.15 y 0.3 ton/ha), implica un costo de entre \$38.3 y 54.5 dólares. Mencionaron también la limitación de su trabajo, pues se requieren más estudios que enfatizen los diversos servicios ambientales del suelo, más allá de la producción y consideran que indudablemente el suelo está subvalorado como sistema natural. Según el Censo Agropecuario (INEGI, 2007), la erosión del suelo, el descanso de la tierra y la baja fertilidad fueron las razones por las que no fue sembrado el 30.9% de las unidades de producción durante el ciclo primavera-verano del 2007.

1.2 Proceso de erosión

El proceso de erosión hídrica sucede en tres etapas: desprendimiento, transporte y depósito de partículas de suelo y minerales (García-Chevesich, 2009). Esto ocurre por el efecto de varios factores ambientales incluyendo la precipitación, tipo de suelo, topografía, vegetación, uso de suelo y prácticas de manejo.

En los trópicos, la precipitación es el factor más importante en el proceso de erosión (Almoza *et al.*, 2008). Las gotas de lluvia chocan contra el suelo provocando el desprendimiento de partículas y la ruptura de agregados, lo cual se conoce como erosión por salpicado o *splash erosion*. La cantidad, intensidad y distribución de la precipitación son determinantes para la energía cinética y con ello la erosividad de la lluvia. Cuando la capacidad de infiltración es

sobrepasada por la precipitación, se genera un escurrimiento superficial capaz de arrastrar y seguir desprendiendo partículas y agregados de suelo (Almoza *et al.*, 2008).

El conjunto de propiedades edáficas que determinan la susceptibilidad del suelo a sufrir erosión, se denomina erodabilidad. Estas propiedades consisten en la estructura, textura, densidad aparente, contenido de materia orgánica del suelo y porosidad, pero también en las características morfológicas de la superficie del suelo como es la presencia de costras, superficies selladas, pedregosidad y afloramiento de rocas. Los suelos con textura de media a fina, con bajo contenido de materia orgánica y de débil desarrollo estructural son los más vulnerables (Pimentel y Kounang, 1998). Lo contrario sucede con los suelos meteorizados y con alto contenido de arcilla, así como aquellos con alto contenido de materia orgánica y con una buena estructura, que suelen ser más resistentes a la erosión (Juo y Franzluebbbers, 2003).

Los terrenos con pendientes de mayor longitud, mayor grado de inclinación y forma recta son más fácilmente erosionables, debido a que la gravedad incrementa la velocidad que alcanza la escorrentía y por lo tanto, el potencial de arrastre del suelo. Los terrenos planos, por otro lado, favorecen al proceso de sedimentación (García-Chevesich, 2009).

A escalas de parcela o de una ladera, la cobertura vegetal y el contenido de materia orgánica son importantes en los procesos de agregación de suelo y de infiltración (Boix-Fayos *et al.*, 2006), y por ende, en el proceso de erosión. A mayor agregación o formación de estructura del suelo se tendrá mayor resistencia ante la fuerza de arrastre de la escorrentía.

En diversos estudios se analizó cómo los cambios en las coberturas vegetales, especialmente los provocados por actividades humanas, enfermedades, incendios y el cambio climático, conducen a fuertes cambios en las tasas de erosión (Bruijnzeel, 2004; Cerdá y Doerr 2005; Sidle *et al.*, 2006; Viles, 1990). Sin embargo, son escasos los estudios donde se analiza la forma en que los diferentes estratos vegetales afectan este proceso, además, suelen ser análisis de un solo estrato, ya sea el herbáceo (De Baets *et al.*, 2011), arbustivo (García-Estringana *et al.*, 2013) o arbóreo, Únicamente en el trabajo de Cerdá y Doerr (2005) se reporta cómo influyen los tres estratos sobre

la escorrentía y la erosión, concluyendo que a mayor cobertura, el estrato que mejor redujo la tasa de erosión fue el herbáceo, seguido por el arbustivo y por último, el arbóreo.

Es bien conocido que los sistemas con cobertura vegetal de cualquier estrato, mitigan la erosión. Las partes aéreas de los estratos vegetales amortiguan la energía del impacto de las gotas de lluvia. La aportación de hojarasca, ramas y demás materia orgánica, provee rugosidad a la superficie del suelo, de tal forma que además de proteger del impacto de las gotas, reducen la velocidad de la escorrentía superficial (Lal, 1983; Durán-Zuazo y Rodríguez-Pleguezuelo, 2008).

Los troncos y tallos generalmente actúan, a nivel del suelo, como obstáculos durante el arrastre de partículas promoviendo la sedimentación (o depósito) de suelo, a la vez que aportan materia orgánica al suelo (Viles, 1990). Por otro lado, las raíces de cualquiera de los estratos vegetales incrementan la capacidad de infiltración del agua hacia el subsuelo, reduciendo el volumen del escurrimiento superficial y actúan como estructuras de anclaje del suelo, evitando movimientos de masa o deslizamientos más severos sobre todo si se trata de raíces profundas de árboles (Renard y Foster, 1983; Boix-Fayos *et al.*, 2006; Quiroz-Marín e Hincapié-Gómez, 2007; García-Chevesich, 2009; Brea y Balocchi, 2010; Mohammad y Mohammad, 2010).

En cuanto al efecto de los árboles sobre la erosión hídrica, casi siempre mitigan la erosión, sobre todo cuando existen intercalados en estratos diversificados, como ocurre en los sistemas agroforestales (Craswell *et al.*, 1998). Ejemplo de esto es el trabajo de Gopinathan y Sreedharan (1989), quienes observaron que la inclusión de árboles dentro de plantaciones de yuca redujo la tasa de erosión del suelo hasta un 87% tras un periodo de dos años. Otro ejemplo es el de Sidle *et al.* (2006), quienes reportan que fue posible reducir la erosión laminar en más de un orden de magnitud, incluyendo una cobertura de árboles en cultivos del sureste de Asia. Sin embargo, se han reportado algunos casos en que la presencia de árboles incrementa la erosión. Esto sucede debido a dos causas distintas: la acumulación de agua en las hojas y el *stemflow*. La acumulación de agua de la lluvia ocurre en la superficie de hojas de gran tamaño. Este incremento de volumen de agua que escurre, impacta sobre el suelo con una mayor energía (Gavito *et al.*, 2012). El *stemflow* consiste en el escurrimiento que baja a través de los troncos de los árboles, teniendo un mayor impacto en el suelo que se encuentra en la base de éstos (Viles, 1990; Levia y Frost, 2003).

El tipo de cobertura vegetal y su manejo antrópico suelen ser los factores de mayor interés en el estudio de la erosión debido a su incidencia sobre la promoción o mitigación del impacto de la erosión hídrica y a que pueden ser manejados por el hombre, a diferencia de los otros factores. Generalmente, el impacto de las fuerzas erosivas es mucho menos agresivo en suelos que se encuentran bajo la cobertura arbórea, ya sea natural o plantada por el hombre. Las tasas de erosión típicas anuales en terrenos planos, con cobertura forestal, de pastizal natural y en algunos sistemas agroforestales como el cafetal de sombra son de 0.001 a 2 t ha⁻¹ año⁻¹. En laderas con pendientes moderadas a escarpadas bajo estas coberturas, las tasas son de 0.01 a 5 t ha⁻¹ año⁻¹, mientras que en terrenos agrícolas se tiene, a nivel mundial, una tasa de erosión promedio de 30 t ha⁻¹ año⁻¹, mucho más variable, desde 0.1 t ha⁻¹ año⁻¹ en cultivos con buena cobertura vegetal y un buen manejo hasta 400 t ha⁻¹ año⁻¹ en cultivos con pendientes escarpadas y bajo la incidencia de tormentas tropicales (Pimentel y Kounang, 1998; McHugh *et al.*, 2005).

1.3 Erosión en cafetales de sombra en Veracruz

En Veracruz se concentra el 33% del escurrimiento superficial de México (CSVA, 2005), por lo que gran parte de su territorio está expuesto a altas tasas de erosión. Se reporta que el 46% del estado de Veracruz presenta una erosión hídrica potencial, el 9.11% del territorio tiene una erosión potencial hídrica ligera, 19.5% moderada, 10.11% severa y el 7.2%, muy severa (SEMARNAT, 2002).

El cambio de uso de suelo ha impactado a gran parte del estado de Veracruz. Según Manson (2004), debido a la alta tasa de deforestación, entre los años 1984 y 2000, el 36% de la cobertura boscosa del estado ha sido convertida a pastizales y terrenos agrícolas. Cabe resaltar que en Veracruz, 20% del territorio se dedica a la agricultura y más del 40% a la ganadería (SEMARNAT, 2003). Uno de los cultivos más importantes para el Estado son los cafetales, los cuales abarcan una extensión de 150,397.21 ha, equivalente al 2% del territorio estatal (SAGARPA, 2010).

La mayoría de los cultivos de café en el estado de Veracruz se concentran en el centro, ya que es un lugar idóneo debido a características topográficas, edáficas y climáticas (Manson *et al.*, 2008).

La especie que mayormente se cultiva es *Coffea arabica*, que tiene requerimientos de clima templado con alta humedad y de cobertura de dosel o sombra mayor al 40%. Además, esta especie es reconocida por producir un grano de mejor calidad (Soto-Pinto *et al.*, 2000). En partes más bajas y calientes (menores a 900 msnm) se pueden encontrar cafetales intercalados con la especie *Coffea robusta* o con injertos, mismos que requieren menos sombra para su producción.

Los sistemas de producción dominantes en cafetales de sombra con *Coffea arabica* son los policultivos comerciales y tradicionales (Hernández-Martínez, 2008). Bajo esta estrategia de manejo, los arbustos de café se intercalan con árboles nativos, frutales como cítricos, platanales o aguacates, hortalizas; maderables y otras con usos medicinales, ornamentales, de construcción o incluso religiosos, para proveer las características microclimáticas que requieren los arbustos de café (Moguel y Toledo, 1999). De esta manera, los productos se diversifican, tanto para el autoconsumo como para la comercialización regional, al mismo tiempo que alberga un sistema biodiverso que puede proveer diversos servicios ambientales. Entre los servicios más reconocidos de los cafetales están los hidrológicos, la captura de carbono, la conservación de biodiversidad y el mantenimiento de la fertilidad del suelo (Geissert e Ibañez, 2008; Cerdan-Cabrera *et al.*, 2012).

Gran parte de los sistemas cafetaleros se ubica en zonas montañosas con pendientes escarpadas donde está latente el riesgo de erosión hídrica y por lo tanto, la posible degradación de la productividad de los terrenos donde se encuentran (Varangis *et al.*, 2002; Rosas-Arellano *et al.*, 2008). La erosión que pudiera estar ocurriendo en estas partes altas conllevaría a la afectación en las partes medias y bajas de la cuenca, debido a los impactos de aporte de sedimentos a cuerpos de agua, incremento de la escorrentía superficial, incremento del riesgo de inundación y disminución de la recarga de acuíferos.

Actualmente en el estado de Veracruz, como ocurre en varios países latinoamericanos, los bajos precios del café, la falta de políticas públicas para un comercio justo y el bajo rendimiento del café afectan a los productores, llevándolos al abandono de sus fincas, al cambio de actividades, a la migración y a la transformación de sus fincas a usos de suelo que son más impactantes al ambiente, entre ellos el cultivo de caña de azúcar que requiere la extracción de árboles y fuertes insumos de agroquímicos y la urbanización (Varangis *et al.*, 2002; Mestries-Benquet, 2003).

Según Perfecto *et al.* (1996), en Latinoamérica se han difundido prácticas que intensifican el manejo de cafetales, supuestamente reducen el costo y esfuerzo de trabajo, y que mejoran el rendimiento de café. Entre estas recomendaciones están: 1) la inclusión de variedades de café “mejoradas” y el incremento de la densidad de cafetos, 2) la implementación de fertilizantes y plaguicidas químicos y 3) el uso de herbicida para el control de la hierba, llevando a una disminución de la biodiversidad y de la cobertura vegetal.

Estos cambios en el manejo de los cultivos, si bien pueden aumentar la producción del café a corto plazo, también pueden traer efectos negativos a largo plazo, tanto a los productores como al ecosistema, que deben ser cuantificados. La inclusión de nuevas variedades de café que en muchos casos tienen mayores requerimientos de luz, lleva a la disminución en la densidad de árboles. La implementación de fertilizantes y plaguicidas químicos es una fuente de contaminación que impacta la biodiversidad, las propiedades del suelo (García-Pérez *et al.*, en prensa) y la calidad del agua, al mismo tiempo que incrementa el costo del mantenimiento de los cafetales (Perfecto *et al.*, 1996). Por otro lado, el uso de herbicida en Veracruz, ha sido considerado por muchos, como una solución para reducir el costo de jornales y el esfuerzo de trabajo durante el control manual de la hierba de manera manual (A. Zilch, comunicación personal, marzo de 2012). El herbicida representa otra fuente de contaminación que, además, puede llevar a un incremento en las tasas de erosión, debido a la eliminación de la cobertura de hierba que protege al suelo.

Poco se ha estudiado el impacto ambiental que pudiera tener la modernización e intensificación de cafetales que se encuentran en zonas con alta precipitación y relieves escarpados (Perfecto *et al.*, 1996). Algunos estudios reportan que los cafetales de sombra o con cobertura de hierba, presentan menores tasas de erosión comparado con los de sol o en los que se aplica herbicida (Ataroff y Monasterio, 1997; Arellano, 2000; Perez-Nieto *et al.*, 2005, Cuadro 2). Estos estudios se llevaron a cabo bajo el método de predios de escurrimiento durante diferentes periodos de tiempo, desde 7 meses de un año hasta 23 meses de cuatro temporadas de lluvia.

Los métodos para el control de la hierba que parecen contribuir a una mayor sustentabilidad del cultivo son el chapeo y el manejo integral de arvenses (MIA) (Afandi *et al.*, 2002; Quiroz-Marín

e Hincapié-Gómez, 2007). El manejo integral de arvenses consiste en el deshierbe selectivo mediante corte con machete o aplicación de herbicida, que permite el dominio de hierbas “nobles”. Las hierbas que se consideran nobles para los cultivos son las perennes con crecimiento rastrero, que no compiten con los cafetos por los nutrientes y que resultan ser una cobertura perfecta para el suelo, tales como *Canavalia ensiformis*, *Arachis pintoii* (cacahuatillo) y *Commelina* spp. (Rivera-Posada, 1997). Quiroz-Marín e Hincapié-Gómez (2007) indican que intercalar cultivos transitorios con un manejo integrado de arvenses genera ingresos adicionales sin afectar la producción de café y que la presencia de algunas hierbas como las leguminosas, pueden mejorar la disponibilidad de nutrientes. Asimismo, es una práctica preventiva para la conservación de suelos que a largo plazo reduce los costos del mantenimiento del cafetal.

Fuente	Sistema	Periodo de estudio	Precipitación anual (mm)	Pendiente de ladera (°)	Erosión (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	
Arellano, G. R. (2000)	Café con sombra arbórea	16 meses	1343*	21	0.38**	
	Café sin sombra			20	0.31**	
	Café con árboles de naranjo			21	1.04**	
Afandi et al. (2002)	Café con suelo desnudo	Temporadas de lluvias durante 4 años (23 meses en total)	1136.9 **	15	8.8-22.7***	
	Café con <i>Paspalum</i> sp. (pasto)				0-2.7***	
	Café con hierbas nativas				0.16-1.5***	
Ataroff y Monasterio (1997)	Cafetal de sol	2 años	1779	31	0.73-1.57*	
	Cafetal de sombra				0.43-0.79*	
Quiroz-Marín e Hincapié-Gómez (2007)	Cafetal con maíz y manejo MIA ⁺	10 meses	1938*	26	1.57**	
	Cafetal con maíz y herbicida				3.35**	
	Cafetal con frijol y MIA				3.46**	
	Cafetal con frijol y herbicida				4.82**	
Perez-Nieto et al. (2005)	Cafetal rústico	7 meses	2200	27.5	0.42**	
	Policultivo de café con <i>Canavalia ensiformis</i>				41.9	1.95**
	Policultivo de café con <i>Arachis pintoi</i>				37.2	2.02**
	Policultivo de café con barreras vivas de palo de agua (<i>Dracaena fragans</i>) y <i>Chamaedorea</i> sp.				29.7	1.05**

Cuadro 2. Tasa de erosión hídrica medida en diferentes sistemas cafetaleros. *Precipitación media anual, **durante el periodo de estudio, ***por temporada, +MIA= Manejo integrado de arvense

1.4 Métodos comunes de medición de la erosión

Se han desarrollado diversos métodos para medir o estimar la erosión presente y potencial bajo diferentes escalas espaciales y temporales. Estos deben ser elegidos dependiendo de la disponibilidad de tiempo, recursos y de la accesibilidad a los sitios de estudio, así como del tipo de erosión y la precisión con que se quiere estudiar. Los métodos que se han desarrollado pueden ser directos o indirectos (Toy *et al.*, 2002). Los métodos directos son aquellos en que se efectúan mediciones en campo, mientras que los indirectos son estimaciones que se logran mediante ecuaciones y modelos basados en índices obtenidos a partir de bases de datos preexistentes que pueden ser verificadas. En el Cuadro 3 se muestran las ventajas y desventajas de los tipos de medición más recurridos.

Tipo	Método	Ventajas y desventajas
Directo	Predios de escurrimiento	<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Precisión. • Permite la medición de la escorrentía superficial así como el análisis de propiedades físicas y químicas del suelo, y escurrimiento colectado. <p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gran esfuerzo y gasto para su instalación, mantenimiento y registro de datos. • “Vida útil” limitada cuando los sedimentos sueltos son transportados en su totalidad. • Posible recambio de sedimentos con otras áreas. • Genera un solo dato para toda el área.
	Parcelas con estacas	<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Para estudio de la erosión laminar y en surcos. • Método simple y económico. • Útil en estudios de larga duración o en sitios que presentan una alta tasa de erosión. • Permite abarcar un gran número de sitios o grandes extensiones con poco mantenimiento. • Puede permanecer mucho tiempo antes de medir. • Aporta datos de la distribución espacial de la erosión y la sedimentación. <p>Desventajas :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Alta variabilidad. • Se necesita un gran número de estacas para tener precisión. • Falta estandarización.
	Marcadores radioactivos (Be ⁷ , Cs ¹³⁷)	<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Permite conocer la redistribución del suelo a corto, mediano o largo plazo con buena precisión. <p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Método costoso y complicado.
	Simuladores de lluvia	<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Permite controlar y estudiar el impacto de la lluvia bajo diferentes patrones de intensidad y cantidad. • Ahorra tiempo. • Registra datos sobre la infiltración, escorrentía.

		<p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Método costoso. • Hay un rango limitado de intensidad de lluvias, distribución del tamaño de gotas y energía. • No suele ser representativo para eventos naturales.
Indirecto	<p>Ecuación RUSLE (<i>Revised Universal Soil Loss Equation</i>)</p>	<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Indica la tasa de erosión potencial a escala de parcela o de grandes extensiones. • Generación de mapas. • Requiere menor trabajo en campo por lo que es adecuado para lugares de difícil acceso o para reducir costos. <p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Su precisión depende de la calidad de datos disponibles. • Generaliza de acuerdo con la información que se tiene sin considerar algunos detalles.
	<p>European Soil Erosion Model (EUROSEM)</p>	<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hace una simulación dinámica del flujo de la escorrentía, infiltración, transporte de sedimentos y erosión laminar y en surcos. • Considera la topografía para encontrar zonas de sedimentación. • Modela el proceso bajo diferentes escalas y a partir de un evento de tormenta. • Genera mapas y gráficas. • Considera la interceptación de la vegetación sobre la energía de precipitación, la velocidad de la escorrentía y su capacidad de transporte. • Requiere menor trabajo en campo por lo que es adecuado para lugares de difícil acceso o para reducir costos. <p>Desventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Su precisión depende de la calidad de datos disponibles.
<p>Fuentes: Boix-Fayos <i>et al.</i>, 2006; Hudson, 1997; Brea y Balocchi, 2010; Garcia-Chevesich, 2009; Morgan <i>et al.</i>, 1998; Renard <i>et al.</i>, 1991.</p>		

Cuadro 3. Ventajas y desventajas de los métodos de medición y estimadores más comunes de la erosión laminar y en surcos.

1.5 Medición de la erosión con estacas

En los estudios y revisiones donde se habla del método de las estacas, se manifiesta la falta de estandarización del método, ya que cada trabajo muestra un diseño diferente, sobre todo en la definición del tamaño y forma de las parcelas y de la manera en que se deben tomar las mediciones (Cuadro 4). La importancia que tiene la estandarización del método radica sobre todo en la posibilidad de comparar los resultados de diferentes estudios. Mientras no exista una estandarización, es muy difícil saber si la variabilidad en la tasa de erosión es provocada por factores y procesos naturales o por el método (Boix-Fayos *et al.*, 2006).

El tamaño de las parcelas es casi tan importante como el método, ya que dependiendo de la escala del estudio, se registran distintos procesos de erosión. A escala parcela, la movilización de sedimentos se debe en gran parte a la erosión provocada por salpicadura de lluvia (*splash*), erosión en surcos y la erosión laminar. La variación en la pérdida de suelo suele ser alta debido a la microtopografía y la presencia de un tronco o de rocas, que pueden afectar fuertemente el resultado local (Boix-Fayos *et al.*, 2006). Este problema puede ser resuelto si se considera un diseño en bloques dentro de los sitios de estudio, así como el número adecuado de repeticiones. En cuanto a la estandarización del punto de la estaca donde se debe de tomar la medición, no se encontró en ningún trabajo una justificación de por qué la llevaron a cabo de determinada manera. Llama la atención que sólo en tres de los trabajos revisados, se informa de qué lado de la estaca se tomó la medición (Cuadro 4).

Autor	Título	Sistema estudiado	Tamaño de parcela (m)	Distancia entre estacas	Sitio de medición
Pizarro y Cutiño, 2002	Metodología de los clavos de erosión para la evaluación cuantitativa de la erosión hídrica superficial	Predio experimental en una zona con clima templado cálido, suelo desnudo.	10 por 1.2	30cm a lo largo, 40cm a lo ancho.	A un lado de la estaca.
Pizarro et al., 2010	Evaluación de la erosión hídrica superficial en zonas áridas y semiáridas de Chile central	Tres unidades de relieve: Los Andes, Depresión intermedia y Cordillera de la Costa. Suelo desnudo.	No menciona	No menciona.	A un lado de la estaca.
Shi et al., 2011	Comparison of the soil losses from Be ⁷ measurements and the monitoring data by erosion pins and runoff plots in the Three Gorges Reservoir region, China	Predio experimental, suelo desnudo.	10 por 4	Cada metro.	No menciona.
Schumm, 1964	Seasonal variations of erosion rates and processes on hillslopes in western Colorado	Zona árida y semiárida de pastoreo temporal.	Transectos a lo largo de la ladera	Variable.	No menciona.
Goudie et al., 1990	Geomorphological Techniques	Es una revisión de los métodos.	No menciona	No menciona.	Muestra dibujo de Haigh (1977) con la medición en la parte baja.
Gavito et al., 2012	Evaluación del impacto ecológico del cultivo de aguacate a nivel regional y de parcela en el Estado de Michoacán	Huertas de aguacate.	10 por 8	2 metros.	Parte baja (Y. Merlin, 2013, comunicación personal).
Gómez-Martínez, (s/f)	Evaluación del ecosistema ripario en ríos de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca	Ecosistema ripario.	4 por 2	Variable, entre 1 y 2 metros.	Parte alta (Gómez-Martínez, comunicación personal, 2013).
Vásquez y Tapia, 2011	Cuantificación de la erosión hídrica superficial en las laderas semiáridas de la Sierra Peruana	Laderas "sometidas a un franco proceso de degradación".	Parcelas de 4.4 por 1.2 m	Cada 40 cm.	A un lado.
Marín y Desir, 2003	Comparación entre distintas técnicas de medida de erosión	Suelo desnudo.	415 y 54.4 m ²	Cada metro.	No menciona.
Sirvent et al. 1997	Erosion rates in badland areas recorded by collectors, erosion pins and profilometer techniques (Ebro Basin, NE-Spain)	Zona semiárida.	57 y 24 m ²	Cada metro, en patrón cuadrículado.	No menciona.

Cuadro 4. Resumen de estudios de erosión que utilizaron el método de estacas.

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivo general

Medir con el método de estacas la tasa de erosión neta en laderas de policultivos de café de sombra en la región de Huatusco, Veracruz; en relación con distintos tipos de control de la cobertura vegetal y de hojarasca.

2.2 Objetivos específicos

- Medir la variación (intra e inter-sitios) en la pérdida de suelo durante un año, en policultivos de café de sombra, utilizando el método de parcelas con estacas.
- Medir el efecto que tienen el chapeo versus el uso de herbicida en el proceso de erosión, así como el grado de variabilidad de este efecto entre y dentro las fincas estudiadas.
- Determinar la relación que existe entre el grado de cobertura de hojarasca y herbácea con la tasa de erosión.
- Determinar si existe una relación entre la cobertura arbórea y arbustiva (cafetos) con la tasa de erosión.

2.3 Hipótesis

1. Dado que se trata de policultivos de café de sombra con una estructura vegetal compleja que protege el suelo contra la erosión, se esperan obtener tasas bajas de erosión neta de suelo, de entre 2 y 5 t ha⁻¹ año⁻¹ en parcelas control, sujetas al manejo que realiza normalmente cada productor. Se espera encontrar una menor variación intra-sitio que inter-sitio.
2. Se espera registrar una tasa de erosión mayor en las parcelas experimentales donde se elimina la cobertura herbácea mediante el uso de herbicida, respecto a las parcelas donde se lleva a cabo el chapeo, el método más recurrente en la zona para el control de la hierba. Se espera que en las parcelas con chapeo y las de control (método que aplica cada

productor en su finca), se mantenga cierta cobertura herbácea, capaz de reducir el efecto erosivo del escurrimiento y la lluvia.

3. La cobertura de hierba tendrá mayor influencia sobre la tasa de erosión que la cobertura de hojarasca, ya que no sólo interviene como obstáculo para la escorrentía y la retención del suelo, sino que las raíces incrementan la infiltración, de tal manera que disminuye la escorrentía y por lo tanto, la erosión. La hojarasca, en cambio, actúa únicamente como un colchón que reduce el impacto de la lluvia y aporta materia orgánica al suelo.
4. Se espera obtener menores tasas de erosión en las parcelas donde exista una mayor cobertura arbórea y arbustiva, ya que los estudios previos sugieren que estos estratos protegen al suelo de las lluvias y pueden incrementar la capacidad de infiltración.

METODOLOGÍA

3.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra en la región cafetalera de Huatusco, región que presenta la mayor producción de café en el estado de Veracruz (SAGARPA, 2012). Los municipios que abarca son Totutla, Tenampa y Zentla, pertenecientes a la cuenca del río Jamapa, parte de la región hidrológica del Papaloapan, y a la región fisiográfica del Eje Neovolcánico Transversal (INEGI, 2009). De acuerdo con el sistema de información municipal (SEFIPLAN, 2013), el uso de suelo que predomina en dichos municipios es el agrícola, que abarca el 72% de dicho territorio. Los cultivos que hay son de café (59%), caña (31%) y maíz (10%).

La cuenca hidrográfica del río Jamapa cubre 4,062 km². Ésta es una de las dos cuencas de Veracruz que presentan un grado extremo de alteración en su dinámica funcional, considerando el índice de transformación humana del ecosistema, el grado de degradación de suelos, la fragmentación de ríos y deterioro de zonas riparias, la presión hídrica y la contaminación difusa. Así también presenta y un alto nivel de presión debido al crecimiento de la población y a las tendencias de cambio de uso de suelo. Es por esto que es considerada una de las 17 cuencas prioritarias a nivel nacional (Cotler *et al.*, 2010).

El tipo de clima que se presenta en el área de estudio, de acuerdo con la clasificación de Köppen modificado por García (1989) es el semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano (A)C(m), con una temperatura media anual mayor a 18° y 22°C y una temperatura media del mes más frío inferior a 18°C; la precipitación en el mes más seco es menor a 40mm (INEGI, 1988; Soto y García, 1989). De acuerdo con la estación meteorológica de Huatusco, ubicada a una altitud de 1426 msnm, en las coordenadas 19°10'29.2" N y 96°57'44.8" O, la precipitación media anual histórica es de 1938 mm (IMTA, 2007).

Las rocas de la región son ígneas extrusivas del Cuaternario, principalmente toba básica y también algunas rocas sedimentarias del Mesozoico como calizas y areniscas-conglomeradas (INEGI. 2009). Los tipos de suelo más comunes son el Acrisol, el Andosol y el Litosol (FORDECYT-INEGI, 2011). Las fincas de estudio se localizan todas sobre suelo de tipo Acrisol. La topografía que se presenta es accidentada con sistemas de lomeríos y barrancos.

3.2 Sitios de estudio

Los sitios de estudio comprenden una parte de las 59 fincas seleccionadas en el proyecto FORDECYT No. 139398, donde se han llevado a cabo diversas investigaciones con el fin de hacer un diagnóstico y caracterización de los sistemas cafetaleros de la región Faja de Oro del centro de Veracruz, incluyendo estudios del suelo, de la biodiversidad y varios servicios ambientales. Estas investigaciones generaron parte importante de la información, aún no publicada, utilizada en el presente estudio.

Los cafetales más comunes de la región centro del estado de Veracruz son policultivos de sombra. Estos se encuentran en una zona montañosa donde gran parte del territorio tiene pendientes mayores a los 10 grados (INEGI. 2009) y una alta precipitación, considerando que la precipitación media anual del país es de 760 milímetros (CONAGUA, 2011; Fig. 1).

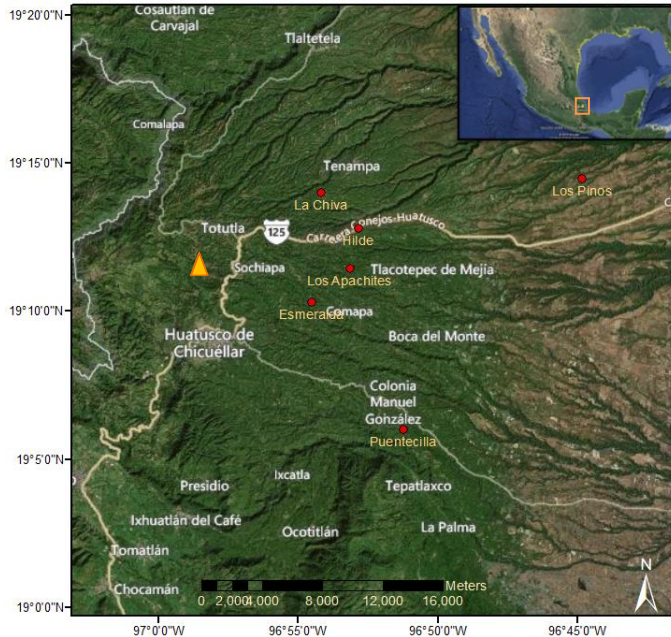


Figura 1. Ubicación y nombre de los sitios de estudio (texto amarillo) en la región cafetalera de Huatusco. Los puntos rojos señalan los sitios de los que se reportan resultados, los azules los que fueron descartados. El triángulo amarillo corresponde a la estación meteorológica de Huatusco.

Los sitios se encuentran entre 890 y 1240 metros sobre el nivel del mar. Para su selección se hizo una revisión de la base de datos generada a partir de encuestas y mapas proporcionados por el proyecto FORDECYT 139398 (2011). De las fincas cafetaleras incluidas en este proyecto se eligieron seis, con características similares en cuanto a los factores ambientales que influyen sobre la erosión hídrica: 1) propiedades del suelo (textura, contenido de materia orgánica, densidad aparente y permeabilidad, tomadas de FORDECYT, 2011), 2) clima (tipo (A)C(m)) y que estuvieran entre las isoyetas de 1500 y 2000 mm (INEGI, 1988 y FORDECYT), 3) longitud y grado de pendiente de la ladera entre 17° y 26°, medida en campo y 4) son policultivos de sombra, con el fin de estandarizar la estructura de la vegetación (arbórea y herbácea, observada en campo, Cuadros 5). Sin embargo, en dos de estas fincas, los sitios experimentales fueron perturbados. Esto sucedió aproximadamente en la mitad del periodo de estudio, por lo que dichas fincas fueron excluidas de los análisis.

	Los Pinos	Hilde	Puentecilla	Los Apachites
Latitud y longitud	19.24106 N - 96.74701 O	19.21306 N - 96.88047 O 19.213059 N - 96.880469 O	19.09994 N - 96.85397 O	19.19000 N - 96.88628 O 19.190798 N - 96.885825 O
Altitud (msnm)	1240	1020	890	1080
Largo de ladera (m)	60m	58m	60m	80m
Pendiente media	18°	17°	26°	18°
Textura de suelo	Franco-arcillosa	Arcillosa	Arcillosa	Arcillosa
Densidad aparente (g/cm³)*	0.77, 0.85 y 0.81	0.95, 0.92 y 0.93	0.95, 0.91 y 0.93	0.8, 0.81, 0.83
Estructura (Agregados)	Bloques angulares, medios a gruesos. Grado estructural (GE) moderado a fuerte y granular.	Bloques subangulares, finos finos y medios. GE moderado.	Bloques angulares medios y gruesos. GE moderado a fuerte.	Bloques angulares y subangulares de medios a gruesos. GE moderado a fuerte.
Materia Orgánica (%)	Alta (11.7 y 10.3)	Media alta (4.5 y 4.5)	Alta (9.1 y 10.7)	Alta (7.2 y 10.2)
Permeabilidad (cm/h)	Muy alta (8.8 y 9.5)	Extremadamente alta (23.5 y 24.9)	Muy alta (4.8 y 10.2)	Extremadamente alta (17.2 y 14.8)
Densidad (Cafetos/ha)	1600	2500	3700	3300
Características de cafetos (Variedad, edad, altura y diámetro de dosel)	Variedades: Typica, Mundo Novo, Oro Azteca. Distintas edades. 1.5 a 3m de altura y 1 a 2.5m de diámetro de dosel.	Variedades: Garnica y Bourbon. Distintas edades. 3m altura y hasta 3.5m de diámetro de dosel.	Variedades: Typica, Robusta y Caturra. 5 años. 2m de altura y 2 de diámetro.	Variedades: Colombia y Costa Rica. 5 años. 1.8m alto y 2m diámetro, distancia a 2m. Nota: Presenta surcos paralelos a la pendiente.
Tipo y frecuencia de manejo de hierba	Chapeo con chapeadora eléctrica en mayo, agosto y noviembre.	Chapeo con chapeadora eléctrica en septiembre y diciembre.	Chapeo con machete a 2 cm. En marzo y septiembre.	Chapeo con chapeadora eléctrica al ras del suelo en marzo y septiembre.

Cuadro 5. Características geográficas, topográficas, edáficas y del manejo de los sitios de estudio.

*Densidad aparente del suelo de cada bloque: la densidad aparente del tercer bloque se calculó con el promedio de los bloques uno y dos (ver explicación en la sección 3.3).

3.3 Parcelas de medición de la erosión por el método de estacas

Los cafetales en estudio son terrenos con vegetación cerrada, donde transita un gran número de personas durante el mantenimiento de la finca y la cosecha de café, por lo que se seleccionó un método que implica instalaciones sencillas. Se utilizó el método de parcelas con estacas que requiere de un menor esfuerzo para su mantenimiento y la colecta de información a comparación de otros métodos, como el de parcelas de escurrimiento. Las parcelas de escurrimiento es el método que más se ha utilizado en estudios como este, pero las instalaciones que requieren son más complicadas en sitios como los nuestros, ya que se requieren colectores de escorrentía y sedimentos con gran capacidad, así como visitas frecuentes para realizar las mediciones y dar mantenimiento debido a que son sitios que presentan alta precipitación.

El método de parcelas con estacas consiste en la delimitación de parcelas rectangulares, en las cuales se instalan estacas, generalmente metálicas y lisas con una rondana o una marca hacia un extremo de éstas (Hudson, 1997), de tal forma que la rondana queda instalada inicialmente sobre la superficie del suelo. Cuando la distancia entre la rondana y el nivel del suelo se incrementa, se considera que hubo erosión. Si por el contrario, dicha distancia se reduce, entonces ha ocurrido un proceso de sedimentación.

Debido a la heterogeneidad de las fincas de café, se siguió un diseño en bloques, dentro de cada una de las fincas seleccionadas se ubicaron tres bloques de parcelas en áreas de ladera. Dos de ellos fueron situados en sitios predefinidos por el proyecto de FORDECYT, donde se realizaron diversos estudios de ecología y edafología. El tercer bloque se ubicó en un área adyacente a los anteriores, siendo prioritario que los tres se encontraran sobre la misma ladera o sobre una pendiente similar, y que presentaran una estructura arbórea y de cafetos representativa de la finca.

En el Cuadro 6 se muestran las características de orientación, pendiente y forma de ladera, así como las especies de árboles presentes en los bloques, incluso tratándose del dosel.

Finca	Bloque	Pendiente (°) y forma de ladera	Orientación	Árboles	Tipos de hierbas
Los Pinos	1	20°, LL	Oeste	<i>Cecropia obtusifolia</i> , <i>Acrocarpus fraxinifolius</i> , <i>Alchornea latifolia</i> y <i>Ficus</i> sp.	Pasto, enredaderas, belén, <i>Zipper</i> sp., <i>Oxalis</i> sp., <i>Commelina</i> sp.
	2	16°, LV	Oeste	<i>Leucaena leucocephala</i> y <i>Heliocarpus</i> sp.	
	3	17°, VC	Noroeste	<i>Inga</i> sp.	
Hilde	1	17°, LV	Oeste	<i>Alchornea latifolia</i> , Comalillo	<i>Commelina</i> sp. y otras
	2	15°, LL	Oeste	<i>Bursera simaruba</i> , <i>Alchornea latifolia</i> , Comalillo, <i>Trema micrantha</i>	
	3	19°, CL	Oeste	Naranjo	
Puentecilla	1	30°, LV	Norte	<i>Cecropia obtusifolia</i>	<i>Impatiens walteriana</i> , pasto, <i>Commelina</i> sp.
	2	22°, LV	Sur	<i>Cecropia obtusifolia</i> y la leguminosa con nombre común “Duela”	
	3	27°, LL	Norte	ND	
Los Apachites	1	17°, VV	Noreste	<i>Quercus</i> sp.	Pasto, diente de león, compuestas de hasta 50cm, <i>Rumex</i> sp., <i>Oxalis</i> sp. <i>Blechnum</i> sp.
	2	21°, VL	Noroeste	<i>Acrocarpus fraxinifolius</i>	
	3	19°, VC	Noroeste	<i>Acrocarpus fraxinifolius</i>	

Cuadro 6. Características de ladera y árboles en los bloques de cada finca. La primera letra de la forma de ladera indica la superficie y la segunda letra el perfil: L= rectilíneo, V= convexo y C= cóncavo (Anexo 1). ND= no determinado.

3.4 Tratamientos

En cada bloque se delimitaron tres parcelas rectangulares de cuatro metros de ancho por ocho metros de largo, con una distancia aproximada de un metro entre una y otra. Este tamaño fue elegido de tal manera en que fuera posible la estimación visual de las coberturas de las parcelas y que la parcela no resultara ser un estorbo para las personas que trabajan en las fincas. Una de las parcelas fue asignada al azar como “control”, otra para aplicar el tratamiento de herbicida y otra para el chapeo. En las parcelas “control” se llevaron a cabo las actividades de la misma manera que en el resto de la finca, con el fin de tener la tasa de erosión del suelo que ocurre actualmente dentro de cada finca. El tipo y la frecuencia del manejo para el control de la hierba se presentan en el Cuadro 5.

Entrevistas realizadas a productores indicaron que el chapeo y el uso de herbicida fueron los más comunes en la región de estudio. El tratamiento de chapeo consistió en el corte de la hierba, con

machete aproximadamente a diez centímetros de altura. Este se realizó tres veces durante el estudio, en los meses de mayo, julio y octubre. El tratamiento de herbicida se realizó una sola vez, en el mes de julio, aplicando una dosis similar a la que utilizan normalmente los productores. Se utilizó glifosato en gránulos marca Rival, cuya composición consiste en 74.7% de glifosato (sal monoamónica de N-(fosfonometil) glicina), disolviendo 100 g en 30 litros de agua para rociarlos sobre las tres parcelas de las seis fincas seleccionadas, correspondiendo a 576 m² en total). Cabe mencionar que los tratamientos se realizaron de la misma manera en todas las fincas.

Para distinguir los tratamientos, se utilizaron diferentes cintas para marcar los límites de cada parcela: amarillas para las parcelas de control, amarillas con esquinas rojas para el tratamiento de chapeo y rojas para el tratamiento de herbicida (Fig. 2).

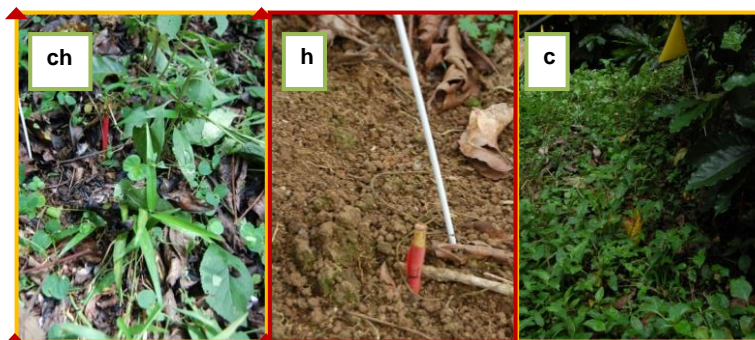


Figura 2. Tratamientos para el control de la hierba: ch= chapeo, h= herbicida y c= control. (Fotografías tomadas en septiembre de 2012).

3.5 Instalación de estacas

Dentro de cada parcela de medición, se clavaron al ras del suelo siete estacas. Se siguió un diseño sistematizado en el que se cubrió de forma representativa los siguientes tipos de cobertura: herbácea, hojarasca y suelo desnudo. Por ejemplo, si dentro de la parcela se presentó 60% de cobertura herbácea, 30% de cobertura de hojarasca y 10% de suelo desnudo, se clavaron cuatro estacas sobre cobertura herbácea, dos estacas sobre hojarasca y una estaca sobre el suelo desnudo. Debido a que sobraron algunas estacas, en algunas de las parcelas se instaló una adicional, teniendo preferencia las parcelas con cobertura vegetal más heterogénea.

Las estacas para medir la erosión (Fig. 3) fueron metálicas y lisas, pintadas de color amarillo para ser más visibles y evitar su corrosión. Las estacas fueron de 30 centímetros de largo y 0.5 centímetros de diámetro, con el fin de que su grosor interfiriera lo menos posible con la escorrentía o el arrastre del suelo (Hudson, 1997). A ocho centímetros del límite superior se les soldó una rondana fija. A un lado de cada estaca, también se colocó un banderín de 60 cm de altura para facilitar su ubicación y evitar su pisoteo.

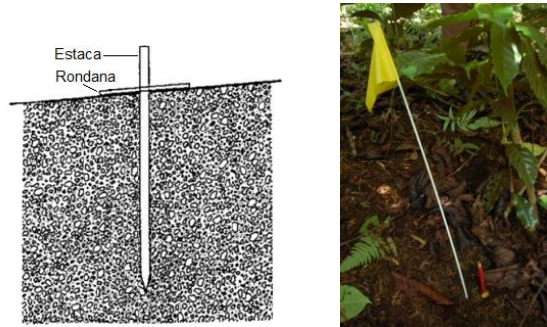


Figura 3. Instalación de estacas (izquierda) y banderín para facilitar su localización (derecha).

3.6 Mediciones

Se tomaron dos mediciones de la distancia (en mm) entre la superficie del suelo y la rondana; una en la parte alta (pendiente arriba) de la estaca (h_1) y la otra en la parte baja (pendiente abajo; h_2) como se puede observar en la Figura 4. Se determinó también el promedio de ambas $(h_1 + h_2)/2$ (en mm). Al calcular las mediciones promedio se tuvo cuidado de considerar pérdidas (erosión) o ganancias (sedimentación) del suelo; por ejemplo, si en la parte alta se presentaba una sedimentación de 5 mm y en la parte baja una pérdida de 2 mm, la medición promedio era igual a 1.5 mm $(5 + (-2)) / 2$.

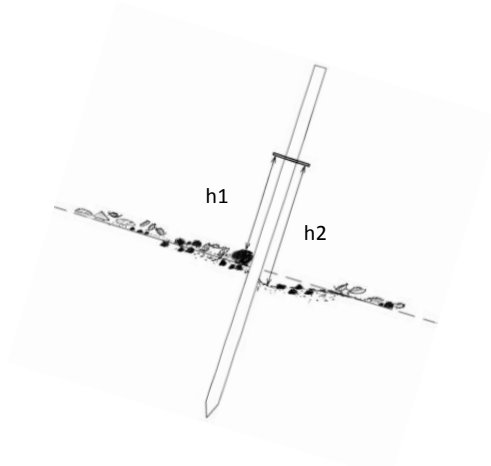


Figura 4. Mediciones realizadas en cada estaca. h1= medición en parte alta, h2= medición en parte baja.

Las estacas permanecieron en su sitio durante un año (principios de mayo de 2012 a finales de abril de 2013). Durante este tiempo se realizaron tres visitas, para tomar mediciones con ayuda de un vernier digital: al inicio de la temporada de lluvias fuertes, en julio; casi concluyendo la temporada de éstas, en septiembre y al completar un año de mediciones, en abril.

Para medir la erosión en cada estaca, se removió la hojarasca y las ramas con mucho cuidado para no perturbar la superficie. La rondana jugó un papel importante al momento de colocar el vernier, el cual siempre se colocaba lo más paralelo posible a la estaca. En los casos de pérdida de suelo, la parte final de la regla de escala se apoyó sobre la rondana para así extraer la regla de profundidad hasta que tocara la superficie del suelo. En los casos donde hubo sedimentación, la regla de profundidad se enterró con cuidado hasta tocar la superficie de la rondana (Fig. 5).

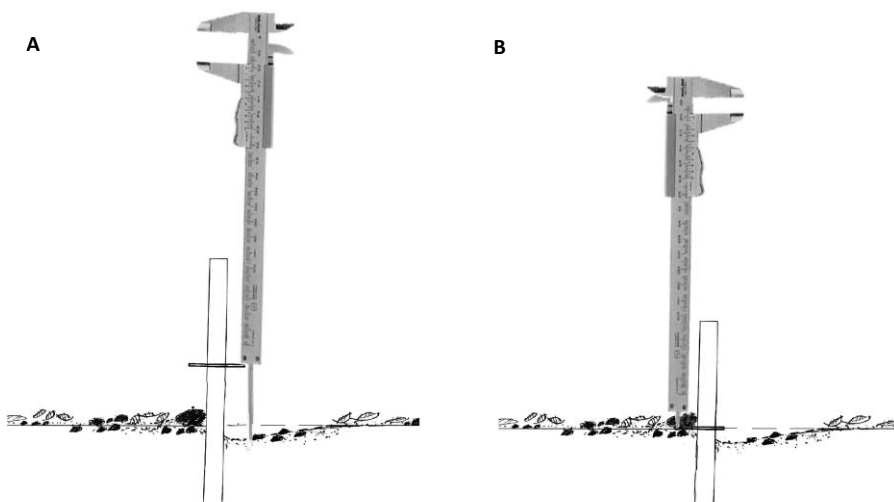


Figura 5. Toma de medición de la erosión con Vernier en las estacas para el caso en que presenten erosión (A) o sedimentación (B)

3.7 Caracterización de la cobertura vegetal en parcelas de medición

3.7.1 Cobertura del suelo

La caracterización de la cobertura vegetal a ras del suelo, en las parcelas de medición, se llevó a cabo en cuatro ocasiones: en mayo, al momento de la instalación; en julio y septiembre de 2012 y en marzo de 2013. Cada parcela se dividió en cuatro para realizar una estimación visual del porcentaje de la cobertura con hierbas, con hojarasca y con suelo desnudo. Esto se hizo con ayuda de la lámina para estimación visual de coberturas propuesta por Folk (1951, Fig. 6). Cabe mencionar que la hojarasca casi siempre se encontró sobre o bajo la hierba, por lo que la suma de estas coberturas y la de suelo desnudo no arrojan necesariamente un 100%.

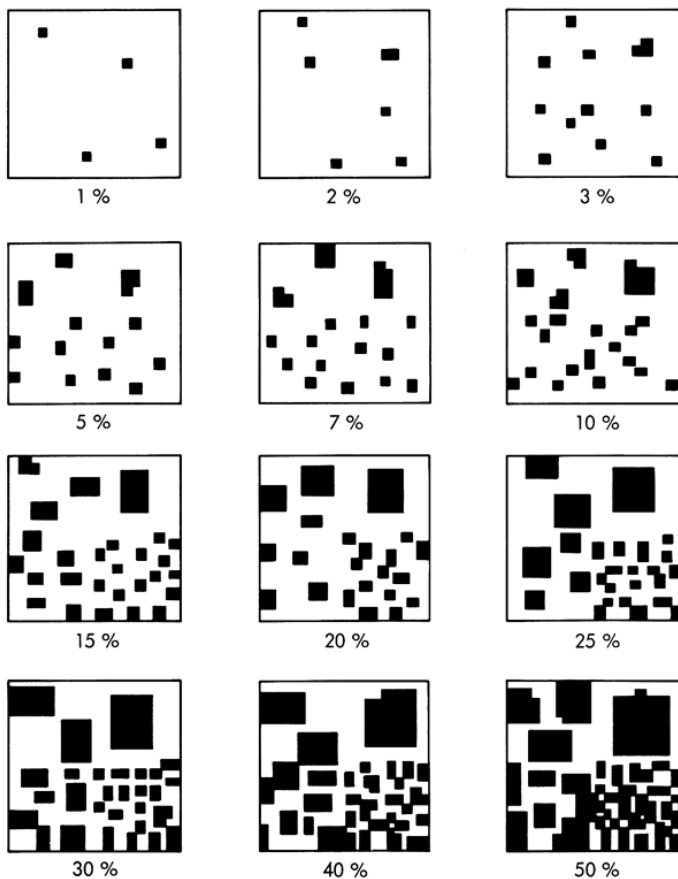


Figura 6. Estimador visual del porcentaje de cobertura del área (Folk, 1951).

3.7.2 Número de cafetos

Se anotó el número de cafetos dentro de cada parcela de medición.

3.7.3 Sombra

Durante el estudio se hicieron dos mediciones de la cobertura de sombra, la primera, en julio (temporada de lluvias) y la segunda en marzo (temporada seca), cuando los árboles caducifolios se encontraban sin hojas. La medición se hizo con ayuda de un densiómetro cóncavo, a una altura aproximada de 1.20 m, por lo que no se excluyó la sombra de los cafetos mayores a esta altura.

La sombra consistió en el promedio medido en tres sitios, dentro de cada parcela de medición; en la parte alta, media y baja.

ANÁLISIS DE DATOS

El análisis de datos se llevó a cabo con ayuda del programa R Studio, versión 0.97.248 (2009). En seguida se presenta el procedimiento seguido para probar las hipótesis planteadas.

4.1 Tasas de erosión (Objetivo 1)

Dado que nuestros registros presentan datos de erosión y de sedimentación, se aplicó el método propuesto por Pizarro y Cutiño (2002), para calcular la tasa de erosión por finca y por tratamiento. Para responder este objetivo, se utilizaron únicamente los datos de las parcelas “control”, es decir, donde se registró la erosión ocurrida bajo el manejo de cada productor en su finca.

Los casos en que se registró una pérdida de suelo (números negativos), fueron calificados como un proceso erosivo, mientras que los casos en que hubo ganancia de suelo (números positivos), fueron calificados como un proceso de sedimentación. A partir de estos datos de erosión (E) y sedimentación (S), se calculó la erosión neta (EN), para cada parcela según las siguientes ecuaciones:

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

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

$$EN = E - S$$

$$SN = S - E$$

Posteriormente se realizó la transformación de milímetros a toneladas por hectárea, debido a que es la medición mayormente reportada en los estudios. Ésta se hizo de la siguiente forma:

$$Y = X * DA * 10$$

Donde:

Y= toneladas por hectárea ($t\ ha^{-1}$)

X= milímetros de suelo acumulado o perdido

DA= densidad aparente (g/cm^3)

También se calculó la pérdida de suelo en kilogramos por superficie de las parcelas. Obtenido el valor de erosión neta en toneladas por hectárea, se le asignó el grado de erosión de acuerdo al Cuadro 1. Como se mencionó en la sección 3.6, se registraron tres grupos de datos, de la parte alta y parte baja de la estaca y del promedio de ambas. Para este objetivo se reportan los resultados para cada grupo de datos.

4.2 Selección de variable de respuesta

Para hacer la selección de la variable de respuesta, es decir, la medición más adecuada (parte alta de la estaca, parte baja o promedio de ambas) y probar las hipótesis planteadas, se consideraron dos aspectos:

1. *El proceso de erosión:* la medición de las estacas puede reportarse como erosión, sedimentación, erosión neta. Únicamente utilizando los valores de erosión neta podemos tener información de los procesos de sedimentación y de erosión, por lo que se tomó la decisión de dar respuesta a los objetivos del estudio utilizando los valores de esta variable.
2. *La manera en que actúa la escorrentía en cada lado de la estaca:* se analizó el registro de las mediciones; de la parte baja de las estacas, de la parte alta y del promedio de ambas. Aunque los estudios revisados para este trabajo no dan indicaciones al respecto (Cuadro 4), aquí se considera que cada grupo de mediciones puede ser válido, aunque presenten algunas desventajas. La medición de la parte alta y el promedio están muy influenciados por los sedimentos que son arrastrados desde más arriba, por lo que es difícil determinar si la remoción de estos ocurrió o no dentro de la parcela de medición.

4.3 Efecto del manejo de vegetación sobre la erosión (Objetivos 2 a 4)

Se probaron las hipótesis acerca de la influencia de los tratamientos y de los diferentes tipos de cobertura vegetal sobre la erosión neta, mediante un modelo lineal mixto. Este tipo de análisis ayuda a tomar en cuenta la variación espacial que presentan los cafetales, razón por la que el diseño experimental fue en bloques. Esto se logra definiendo factores aleatorios y factores fijos.

Los factores fijos son aquellos que incluyen las variables explicativas, que en este caso corresponden a los tratamientos y las coberturas de hierba (%), hojarasca (%), suelo desnudo (%), y de densidad de cafetos (número de arbustos), estimadas en el mes de marzo (2013), además de la cobertura de dosel (%), observada en el mes de julio (2012). La razón por la que se utilizó la sombra de julio en lugar de la de marzo, es que ésta es la que se presenta durante la mayor parte del periodo de estudio, incluyendo cuando se producen las lluvias más intensas y por lo tanto, cuando ocurre mayor erosión. Los factores de efecto aleatorio son aquellos producto de la heterogeneidad del área de estudio (Gail *et al.*, 2007), y que consisten en los bloques de parcelas anidados en cada una de las fincas.

Para encontrar el modelo mínimo adecuado, se realizó un proceso de simplificación (Stepwise) de modelos, haciendo comparaciones entre los modelos que incluían y excluían progresivamente (tipo *both*) las diferentes variables dependientes (Crawley, 2007). En el modelo saturado, que es aquél que incluye todas las variables dependientes e interacciones, en este caso dobles, se incluyeron: el tratamiento, la cobertura de hierba, la hojarasca, el suelo desnudo, la sombra y el número de cafetos por parcela de medición. También se incluyeron las interacciones de segundo orden. Esto se hizo con el fin de garantizar la selección de las variables más explicativas, evitando aquellas que están correlacionadas y por lo tanto, evitando redundancia en el modelo final (Negrete-Yankelevich *et al.*, 2013). A partir de estos modelos, se buscó al más parsimonioso mediante la comparación del Coeficiente de Información Akaike (AIC), lo cual se hizo calculando la diferencia de los AIC (Δ) respecto al menor número de este coeficiente. El modelo elegido fue aquel de mayor simplicidad en cuanto al menor número de variables explicativas y que tuviera un AIC con una diferencia menor a 6 respecto al modelo con el AIC más pequeño (Cayuela, 2012 y Richards, 2008).

RESULTADOS

Hubo perturbaciones antropogénicas importantes por extracción de estacas en dos de las seis fincas de estudio, por lo que los resultados presentados en este estudio sólo contemplan cuatro fincas: Hilde, Los Pinos, Los Apachites y Puentecilla.

El periodo en el que se llevó a cabo el estudio (mayo de 2012 a abril de 2013) fue inusualmente húmedo. La precipitación registrada por la estación meteorológica de Huatusco fue de 2,392 milímetros repartidos en 209 eventos de lluvia y las mayores precipitaciones ocurrieron durante los meses de junio a septiembre. En la Figura 7 se hace una comparación entre la precipitación mensual del periodo de estudio y la media histórica.

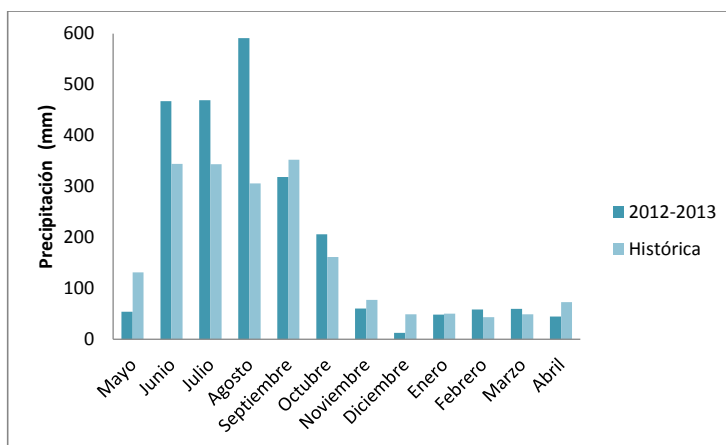


Figura 7. Precipitación mensual durante el periodo del estudio y comparación con el registro histórico (INIFAP, 2013).

Durante el estudio, la mayor cantidad de precipitación se concentró en los meses de junio, julio y agosto. En la Figura 8 se pueden observar los eventos diarios de precipitación para cada mes. Durante esos tres meses ocurrieron las lluvias con mayor potencial erosivo, con 22 eventos de precipitación intensa (mayores a 30 mm), de los cuales 13 fueron muy intensos (mayores a 50 mm).

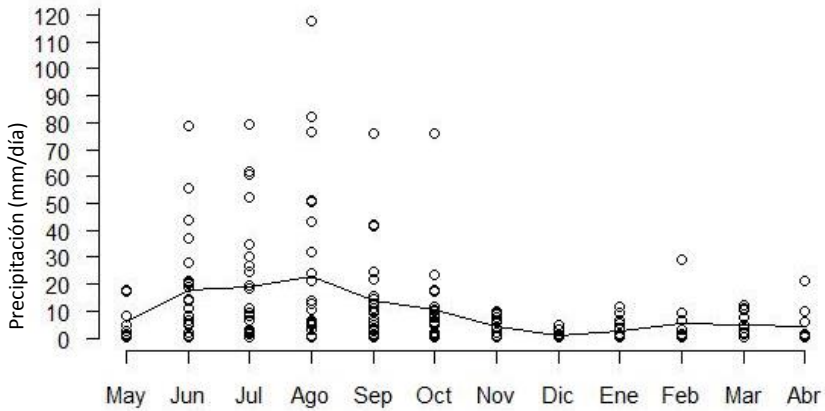


Figura 8. Intensidad de los eventos de precipitación (mm/día) que se presentaron en el periodo de estudio. La línea indica la media de precipitación diaria, en cada mes y cada punto representa un evento diario.

5.1 Tasas de erosión (Objetivo 1)

Tras el análisis para la selección de la variable de respuesta, se consideró que la medición que puede arrojar valores más confiables es la de la parte baja de la estaca.

Las mediciones hechas en la parte alta de la estaca, registraron una alta sedimentación de suelo, en lugar de obtener tasas de pérdida de suelo. Esta sedimentación indica una remoción de partículas que ocurre en la parte superior de donde se registra, sin embargo, al no conocer desde qué distancia proviene, no resulta precisa la erosión que se registró en esta parte de la estaca. Por último, la medición promedio que es la medición en la parte alta, más la medición en la parte baja, divididas entre dos, tenía la intención de uniformizar el terreno rugoso alrededor de la estaca, en parte por la presencia de agregados de diferentes tamaños (Fig. 5). Estos agregados, aunados a la presencia de vegetación y materia vegetal, podrían ser la razón por la que hay tanta diferencia entre la medición tomada en la parte alta y en la medición tomada en la parte baja. Sin embargo, al ser una medición que considera la registrada en la parte alta de las estacas, tiene el mismo problema de imprecisión, por la inclusión de suelo erosionado en partes más arriba de la parcela.

La medición de la parte baja puede arrojar números más confiables, ya que la estaca actúa como una barrera, la cual impide que el suelo erosionado en partes más altas se sedimente en el sitio de

medición, lo cual afectaría el resultado. La desventaja que se le encuentra a esta medición es la posible sobreestimación de erosión, ya que el escurrimiento que se forma a lo largo de la estaca es capaz de socavar e incrementar aún más la distancia entre el suelo y la rondana.

En seguida se presentan los resultados de erosión neta, calculados a partir de cada una de las mediciones tomadas en las parcelas control, tomadas en la parte alta, baja de la estaca y el promedio de éstas.

Erosión neta. La erosión neta anual medida fue, en promedio, de -3.5 mm/año, es decir -107.2 kilogramos de suelo, para cada parcela de medición, equivalente a -33.5 t ha⁻¹ año⁻¹, que corresponde a un grado de erosión moderado. Al tomar la medición en la parte alta de las estacas y la medición promedio, los datos obtenidos resultaron más bien en una sedimentación neta, de entre 0.8 y 4.5 mm, es decir 15.1 y 119.1kg de suelo promedio para cada parcela (4.7 y 37.2 t ha⁻¹ año⁻¹), respectivamente (Cuadro 7). Según la clasificación de SEMARNAT y Colegio de Postgraduados (2003; Cuadro 1), la tasa de erosión medida en la parte baja de la estaca, que es la que consideramos más confiable, es nula para la finca Los Apachites, ligera en Los Pinos y alta para las fincas Hilde y Puentecilla. En los tres grupos de mediciones se presentó una variabilidad muy fuerte tanto dentro de cada finca como entre ellas. Ésta puede observarse en el Cuadro 7, a través del error estándar.

Grupo de medición	Erosión neta	Hilde	Los Pinos	Los Apachites	Puentecilla	PROMEDIO
Parte baja	mm	-7.6±3.5	-0.3±1.4	2.5±4.7	-8.7±2.9	-3.5±4.7
	t ha ⁻¹	-71.4±32.9	-2.3±25.6	20.1±39.1	-80.5±25.9	-33.5±38.6
	kg/32m ²	-228.4±105.4	-7.3±81.8	64.4±125.2	-257.7±83	-107.2±123.5
Promedio	mm	-3.2±4	3.6±2.6	5.3±4.3	-2.6±1.6	0.8±4.7
	t ha ⁻¹	-29.8±37.5	29.2±6.1	43.5±36.2	-23.9±14.4	4.7±35.1
	kg/32m ²	-95.5±120	93.4±19.6	139.2±116	-76.6±46	15.1±112.4
Parte alta	mm	-2.0±4.2	7.5±3.8	9.2±4.8	3.5±0.4	4.5±4
	t ha ⁻¹	-19±39.3	60.6±31.1	74.7±40.3	32.6±3.6	37.2±34.6
	kg/32m ²	-60.9±125.7	194.0±99.4	239±128.9	104.4±11.5	119.1±110.7

Cuadro 7. Media y error estándar de las tasas de erosión neta anual en las parcelas control, según el sitio de la estaca donde se tomó la medición (n = 3). La erosión se indica con números negativos y la sedimentación con positivos.

5.2 Efecto del manejo de vegetación sobre la erosión (Objetivos 2, 3 y 4)

Tras el proceso de simplificación (Anexo 3) se obtuvo un modelo lineal mixto, ajustado por máxima verosimilitud, en el que la variable de respuesta fue la erosión neta en milímetros, medida en las parcelas tras un periodo de 12 meses de exposición. El componente de factores fijos se redujo a las variables de cobertura de hierba y cobertura de dosel, mientras que, en el componente de factores aleatorios, se incluyeron los tres bloques anidados en cada una de las cuatro fincas. El Coeficiente de Información de Akaike fue de 236.68, con un Δ AIC de 3.57, respecto al del modelo que obtuvo el AIC menor y de -17.84 respecto al AIC máximo (Cuadro 8).

De acuerdo al ANOVA obtenido a partir de este modelo, las variables significativas para la erosión, fueron la cobertura de dosel o sombra ($p < 0.01$) y la cobertura de hierba ($p < 0.05$), tal como se observa en la Cuadro 9. Ninguno de los otros factores medidos, incluyendo la hojarasca, el suelo desnudo y el número de cafetos, tuvieron efectos en el modelo, por lo que se pudieron descartar durante el proceso de simplificación. La varianza residual respecto a los efectos aleatorios fue de 2.52. Por otro lado, la parte de los efectos fijos del modelo, indicó que la erosión neta en milímetros pudiera explicarse de la siguiente forma:

$$\text{Erosión neta} = \alpha + (\beta_1 * \text{cobertura de hierba}) + (\beta_2 * \text{sombra})$$

Donde:

α = Intercepto

β_1 = Pendiente de la variable de cobertura de hierba

β_2 = Pendiente de la variable de sombra

Es decir:

$$\text{Erosión neta} = 19.564 + (0.058 * \text{cobertura de hierba}) + (-0.283 * \text{sombra})$$

	Valores
Δ AIC máx.	-17.83
Δ AIC min.	3.57
Varianza del factor aleatorio	1.592
Tratamiento $F_{1,22}$	Ni
Intercepto $F_{1,22}$	4.826 (p= 0.04)
Cobertura de hierba $F_{1,22}$	6.462 (p= 0.02)
Cobertura de hojarasca $F_{1,22}$	Ni
Área con suelo desnudo $F_{1,22}$	Ni
Cobertura de dosel $F_{1,22}$	7.742 (p= 0.01)
Número de cafetos $F_{1,22}$	Ni

Cuadro 8. Modelo de la erosión neta anual de los cafetales, explicada por diferentes estratos vegetales. El valor de F presenta 1 grado de libertad para los valores de x (variable dependiente) y 22 grados de libertad para los residuales. Δ AIC= diferencia del AIC del modelo final con el modelo máximo y mínimo. Ni= variable descartada durante el proceso de simplificación.

5.3 Efecto del manejo de hierba sobre la erosión (Objetivo 2)

Ninguno de los tratamientos para el control de hierba mostró un efecto sobre la erosión neta. Esto puede observarse en las Figura 9 y Figuras 11-16 que presentan la variación de la cobertura de hierba y la erosión registrada en cada tratamiento a través del periodo de estudio.

La variación de la cobertura herbácea para cada tratamiento durante el estudio se muestra en la Figura 9. En el mes de septiembre es evidente la reducción de la cobertura de hierba con el tratamiento de herbicida. Sin embargo, las barras de desviación estándar muestran una variabilidad muy grande, por lo que la diferencia no fue significativa entre la cobertura observada en el tratamiento del herbicida y la de los otros tratamientos.

La cobertura herbácea promedio estimada en el mes de mayo, fue muy parecida en todos los tratamientos (30- 40%). El tres de julio, justo antes de aplicar el herbicida, las coberturas se incrementaron de forma casi paralela (55 y 58%) dentro de las parcelas de control y de chapeo, mientras que en las de herbicida, el incremento fue ligeramente mayor (67%). En septiembre, el herbicida afectó la hierba, dejándola seca y desprendida en forma de rastrojo, por lo que se le consideró como hojarasca (Fig. 10). Las coberturas de hierba promedio en este mes fueron de 59%, 58% y 13% en los tratamientos control, chapeo y herbicida, respectivamente. En diciembre la hierba comenzó a expandirse de nuevo en las parcelas de herbicida, lo cual fue registrado en

marzo de 2013, poco antes de retirar las estacas. En esta última visita se observaron coberturas medias de 42% en el control, 45% en el chapeo y 18% en el tratamiento de herbicida (Fig. 9).

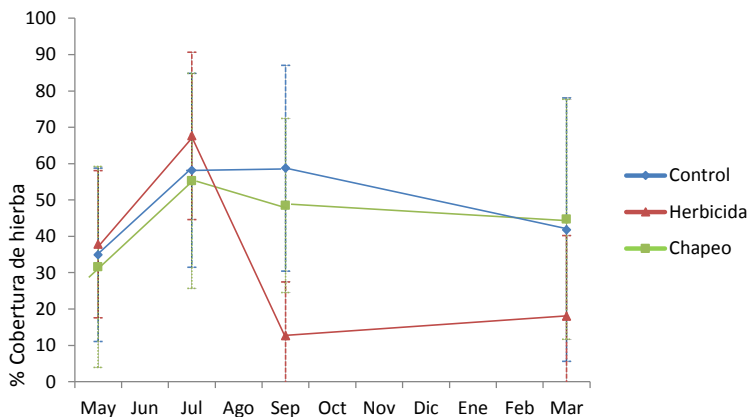


Figura 9. Variación en la cobertura de hierba (%) según el tratamiento (media y desviación estándar). El herbicida fue aplicado en el mes de julio.

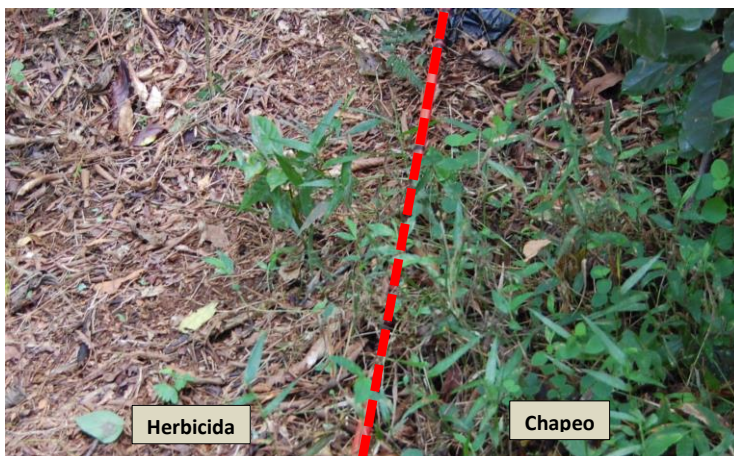


Figura 10. Efecto del herbicida sobre la hierba. (Finca Hilde, septiembre 2012). El área con chapeo corresponde al área entre parcelas.

Los promedios de las cuatro observaciones realizadas durante el estudio, de las coberturas de hierba fueron muy variables, pero similares en los tratamientos de las fincas Hilde, Los Pinos y

Puentecilla. Únicamente en la finca de Los Apachites hubo una diferencia notoria en las parcelas con herbicida, respecto a los otros tratamientos. La cobertura de hierba en las parcelas control de la finca Hilde fue de 51%, en las de herbicida 40.4% y en las de chapeo de 48%. En la finca Los Pinos se estimó en 32% en las parcelas control, 32% en las de herbicida y 27% en las de chapeo. En la finca de Los Apachites, la estimación promedio fue de 82% en las parcelas control, 37.9% en las de herbicida y 72.6% en las de chapeo. Finalmente, para la finca Puentecilla, la estimación fue de 28% en las de control, 25.8% en las de herbicida y 32.4% en las de chapeo (Fig. 11-13).

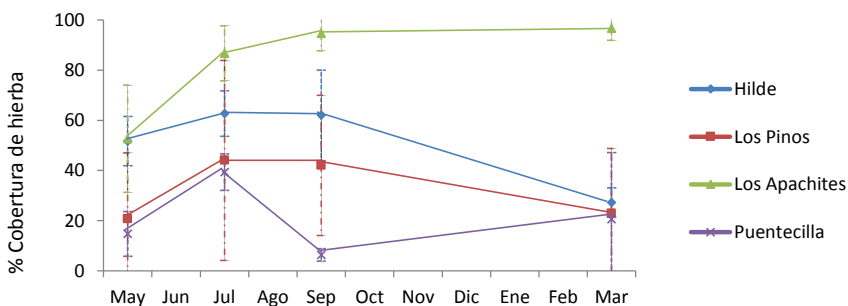


Figura 11. Cobertura de hierba en parcelas “control” (media y desviación estándar), en cada finca durante el periodo de estudio.

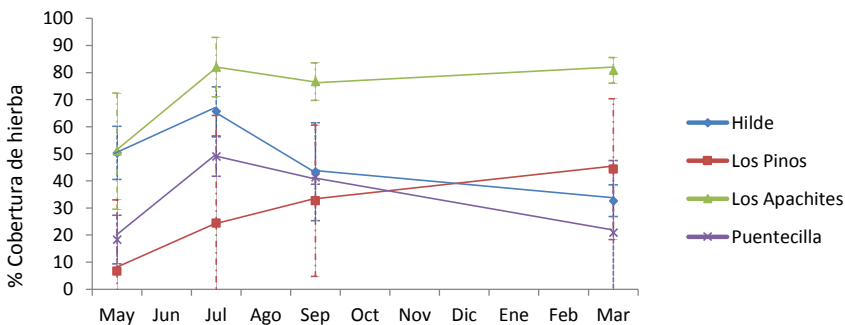


Figura 12. Cobertura de hierba en parcelas con el tratamiento de chapeo (media y desviación estándar) en cada finca durante el periodo de estudio.

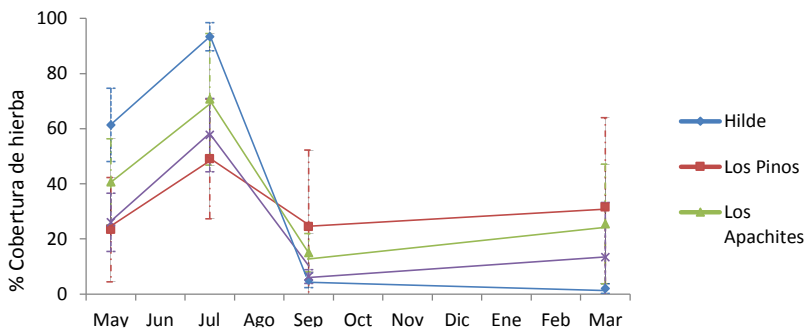


Figura 13. Cobertura de hierba en parcelas con el tratamiento de herbicida (media y desviación estándar) en cada finca durante el periodo de estudio.

En cuanto a suelo desnudo, se encontró en un intervalo de entre 3.8 y 15.2%, siendo las finca Hilde y Apachites las que presentaron una menor área con suelo desnudo. En las parcelas control, hubo 5.4% en la finca Hilde, de 9.7% en la de Los Pinos, 4.2% en la de Los Apachites y 11.8% en la Puentequilla. En las parcelas con el tratamiento de herbicida, la cobertura fue de 5.2% en la Hilde, 15.2% en Los Pinos, 10.6% en Los Apachites y 12.6% en la Puentequilla. Para el tratamiento de chapeo, fue de 3.9% en la Hilde, 9.7% en Los Pinos, 3.8% en Los Apachites y 11.1% en la Puentequilla.

En el proceso de erosión se registró una alta variabilidad entre las fincas y dentro de ellas, para todos los tratamientos (Figuras 14-16). Si la hierba tiene efecto sobre la erosión y el tratamiento de herbicida no logró un cambio significativo sobre la cobertura de ésta, entonces la erosión tampoco resultó distinta bajo los diferentes tratamientos.

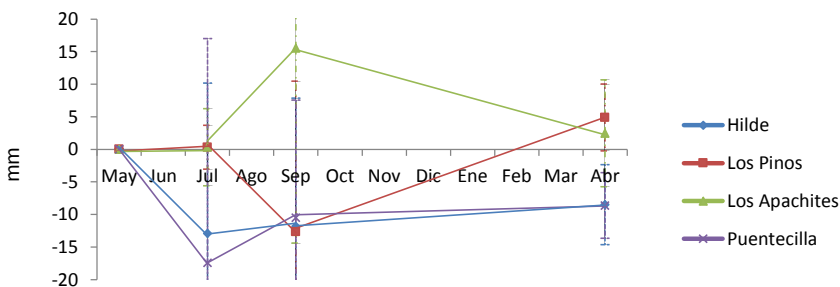


Figura 14. Erosión neta promedio, por finca, para las parcelas control registrada en los meses de julio, septiembre y abril, y su respectiva desviación estándar.

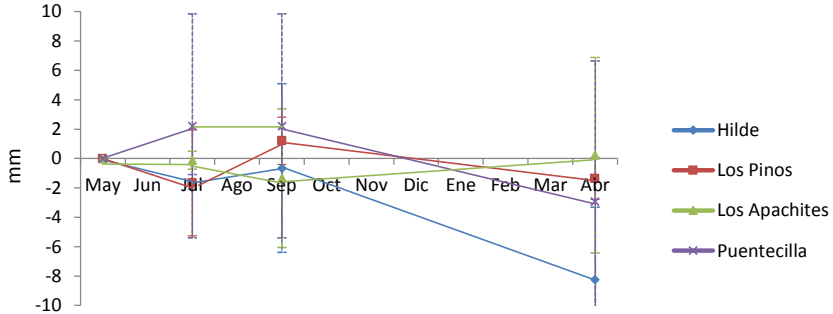


Figura 15. Erosión neta promedio, por finca, para el tratamiento de chapeo, registrada en los meses de julio, septiembre y abril, y su respectiva desviación estándar.

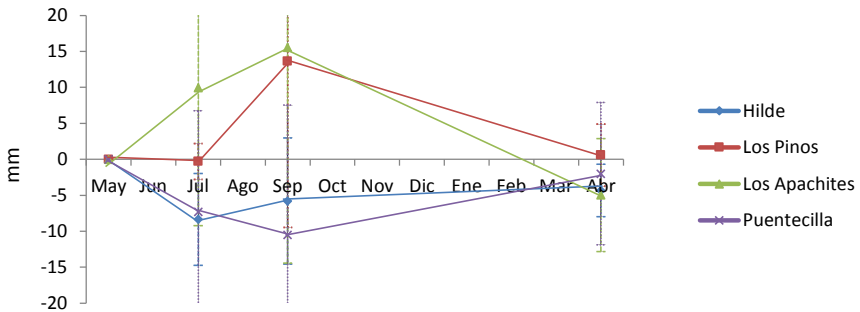


Figura 16. Erosión neta promedio, por finca, registrada para el tratamiento de herbicida, en los meses de julio, septiembre, y abril y su respectiva desviación estándar.

5.3 Efecto de la cobertura al ras del suelo (Objetivo 3)

En lo que respecta a los resultados del modelo lineal mixto, de las coberturas al ras del suelo, únicamente la de hierba presentó un efecto sobre la tasa de erosión neta. A mayor cobertura de hierba hubo una menor erosión y en algunos casos, una mayor sedimentación ($F_{1,21} = 6.46$, $p = 0.02$, Fig. 17). La cobertura de hojarasca y el área con suelo desnudo no tuvieron relevancia sobre la erosión, por lo que fueron descartadas durante el proceso de simplificación del modelo.

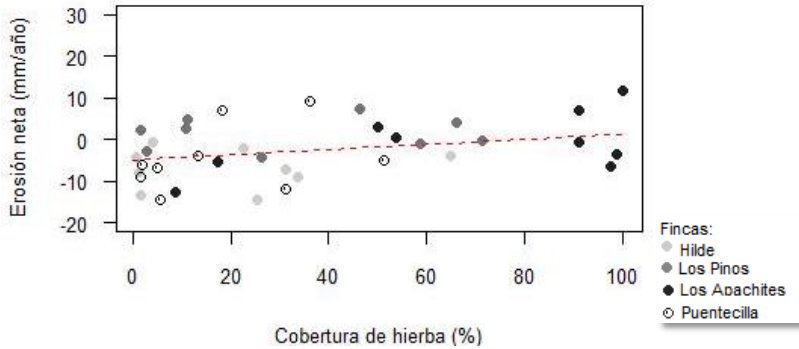


Figura 17. Efecto de la cobertura de hierba sobre la erosión neta. La línea discontinua indica los valores estimados a partir del modelo lineal mixto. La erosión corresponde a los números negativos y la sedimentación a los positivos.

En seguida (Fig. 18-20) se presentan las coberturas promedio con su respectiva variación de hierba, hojarasca y suelo desnudo, estimadas en las parcelas de medición de cada finca, durante los meses mayo, julio, septiembre (2012) y marzo (2013). Se muestra que no hay diferencia significativa entre las fincas para ninguna de las coberturas.

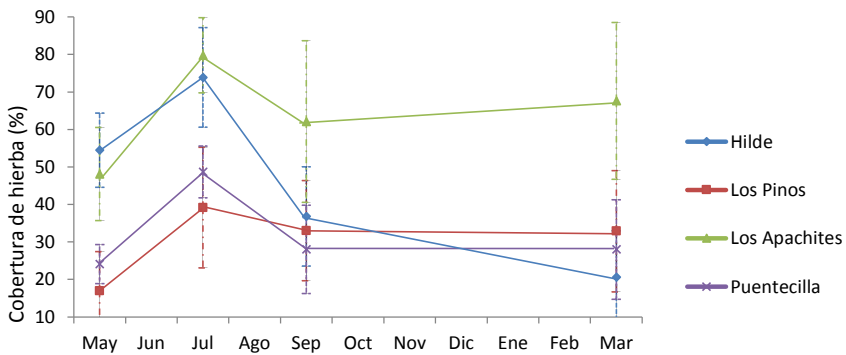


Figura 18. Cobertura de hierba (media y desviación estándar) en cada finca durante el periodo de estudio.

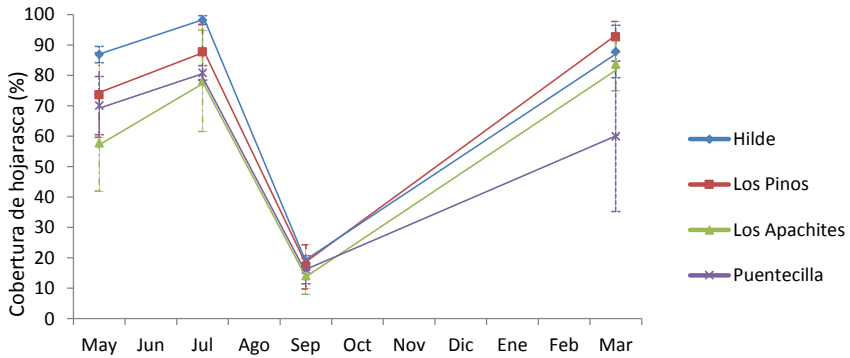


Figura 19. Cobertura de hojarasca (media y desviación estándar) en cada finca durante el periodo de estudio.

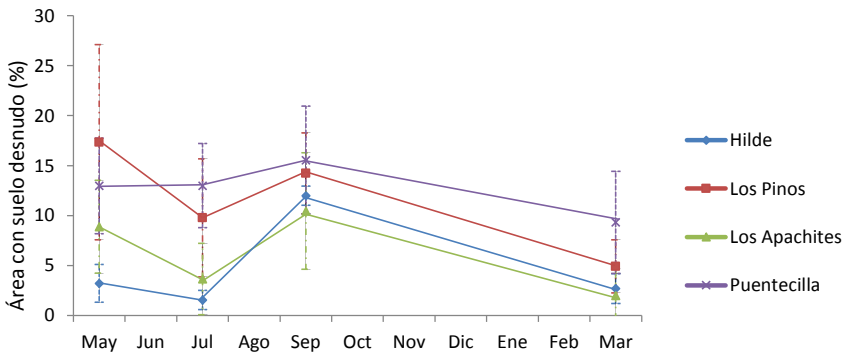


Figura 20. Área con suelo desnudo (media y desviación estándar) observada en cada finca durante el periodo de estudio.

5.4 Efecto de cafetos sobre la erosión (Objetivo 4)

No se encontró efecto alguno del número de cafetos dentro de las parcelas de medición sobre la tasa de erosión registrada. Esta variable fue descartada en el proceso de simplificación del modelo para el análisis de datos, lo cual pudo deberse a la alta variabilidad que se presentó dentro de cada finca (Fig. 21).

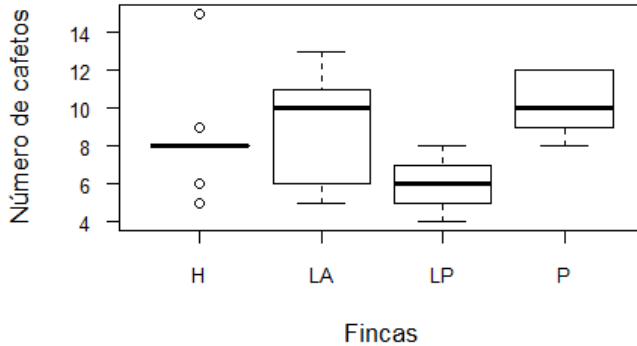


Figura 21. Diagrama de cajas y bigotes con el número de cafetos dentro de las parcelas de medición de cada finca (n= 9): H= Hilde, LA= Apachites, LP= Los Pinos, P= Puentecilla. Se muestran las medianas, los cuartiles y los valores mínimos y máximos.

5.5 Efecto de la cobertura de dosel sobre la erosión (Objetivo 4)

La cobertura de dosel (sombra) estimada en julio mostró un efecto positivo, significativo sobre la erosión neta registrada. A mayor cobertura de dosel se registró una mayor pérdida de suelo ($F= 7.742, p= 0.01$), con una pendiente β de -0.283 (Fig. 22); cabe destacar que ésta fue mayor que la pendiente β de la cobertura de hierba (0.058), lo que significa que la sombra tiene un efecto más fuerte que la cobertura de hierba.

La razón por la cual a mayor dosel se presentó mayor erosión, en parte puede explicarse a partir de la correlación de Spearman, negativa entre la cobertura de dosel y la cobertura de hierba lo cual significa que, a mayor cobertura de dosel, se presentó una menor extensión de hierba en la parcela ($Rho= -0.395, p= 0.017$) y por lo tanto se incrementó la erosión.

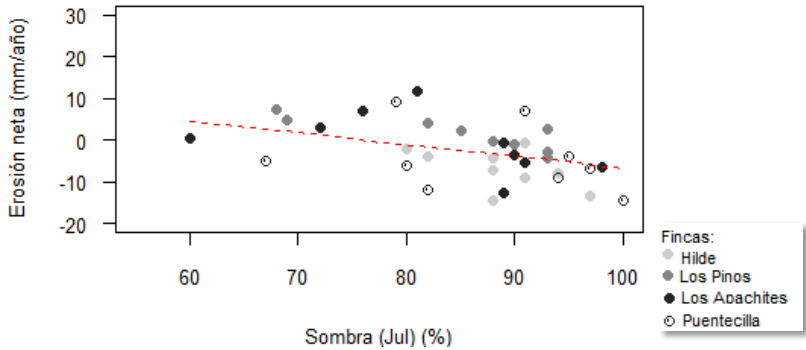


Figura 22. Efecto de la sombra sobre la erosión neta. La línea discontinua indica los valores estimados a partir del modelo lineal mixto. La erosión corresponde a los números negativos y la sedimentación a los positivos.

El porcentaje de sombra promedio de las fincas en el mes de julio 2012, fue de 86% y de marzo del 2013 fue de 63%. Las fincas Los Apachites y la Puentecilla presentaron un mayor cambio de sombra entre los dos periodos, lo que se traduce en una mayor presencia de árboles de especies caducifolias. La finca La Hilde fue la que presentó un mayor porcentaje de sombra promedio (81%), seguida por la finca Los Pinos (77%), luego por la Finca Puentecilla (76%) y por último, la finca Los Apachites (64%) (Fig. 23 y 24).

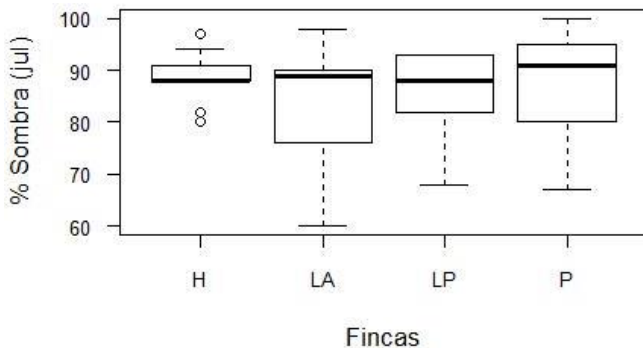


Figura 23. Diagrama de cajas y bigotes con la sombra de cada finca observada en julio (n= 9): H= Hilde, LA= Apachites, LP= Los Pinos, P= Puentecilla. Se muestran las medianas, los cuartiles y los valores mínimos y máximos.

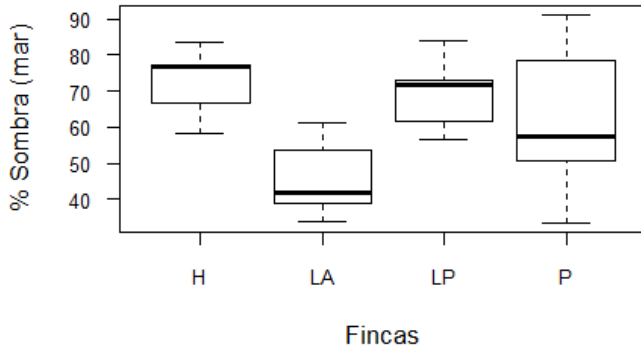


Figura 24. Diagrama de cajas y bigotes con la sombra de cada finca observada en marzo (n= 9): H= Hilde, LA= Apachites, LP= Los Pinos, P= Puentecilla. Se muestran las medianas, los cuartiles y los valores mínimos y máximos.

DISCUSIÓN

6.1 Tasas de erosión

De acuerdo con los resultados obtenidos, la erosión neta promedio en las fincas de café de sombra fue de $33.5 (\pm 38.6) \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Este resultado es mayor a lo reportado en otros estudios realizados con el método de parcelas de escurrimiento, en donde las tasas de erosión medidas en cafetales fueron de entre 0 y 22.5 t ha^{-1} . Este último valor se registró en un cafetal con suelo desnudo, sobre una pendiente similar a la de nuestros sitios de estudio (Afandi *et al.*, 2002). Las tasas más elevadas en el presente estudio pueden ser resultado de diversos factores, uno de ellos es la alta precipitación que se registró en el área de estudio, sin embargo no sería la única razón pues a pesar de esto, en dos de las fincas de la región se registraron tasas de erosión ligera, menor a $5 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Al comparar las tasas de erosión de cada finca, se encontró que únicamente la finca Los Pinos presentó una tasas de erosión ligera ($< 5 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) como era lo esperado. En Los Apachites se obtuvo un resultado inesperado debido al registro de una sedimentación neta. Este resultado es difícil de interpretar, porque se podría pensar que en el sitio la erosión es nula o que ocurre más lentamente que en partes de la ladera que se encuentran más arriba, ya que el suelo sedimentado proviene de más arriba, sin poder saber desde qué distancia. Por el contrario, las fincas Hilde y Puentecilla tuvieron tasas de erosión altas, de 71.4 y $80.5 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, respectivamente. Esta

diferencia entre las fincas parece no tener relación con la cobertura vegetal de ningún estrato, pues como se muestra en las Figuras 10-12, no se observaron características distintas entre las coberturas de las fincas que registraron tasa de erosión ligera o sedimentación neta y las que registraron tasas de erosión altas. Otro factor que pudiera afectar los resultados sería la ubicación de las parcelas sobre la ladera (Wysoki *et al.*, 2000), suponiendo que en la parte media de la ladera la erosión sería más fuerte, mientras que en el pie de ladera ocurre el proceso de sedimentación. Sin embargo, de acuerdo a lo datos de erosión registrados, no se encontraron indicios de que esto sucediera dentro de los sitios de estudio, aunque haría falta analizar esto a una mayor escala.

Existen otros factores, como el contenido de materia orgánica (Luk, 1979) y la densidad aparente del suelo, el tamaño y estabilidad de agregados (Barthès y Roose, 2002; Rai *et al.*, 1953) y la pendiente del terreno, que pudieran estar relacionados con las diferencias entre tasas de erosión medidas, pero estas causas tendrían que ser estudiadas a futuro más detalladamente. Por ejemplo, las fincas con mayor erosión son las mismas que presentaron un suelo con una densidad aparente mayor. La densidad aparente es uno de los factores relacionados con la conductividad hidráulica (Soracco, 2005), siendo que a mayor densidad aparente, existe una menor cantidad de poros, por lo tanto una menor infiltración, menor conductividad hidráulica y una mayor escorrentía superficial. Pero con base en los datos reportados, el suelo con mayor densidad aparente mostró una permeabilidad extremadamente alta. La finca Puentecilla, con la mayor tasa de erosión, fue la que presentó una pendiente más fuerte de 26°, mientras que las otras fincas presentaron pendientes de 17 y 18°. Por otro lado, la finca Hilde, fue la que presentó un desarrollo de los agregados más débil a diferencia de las otras fincas, de acuerdo a la información de campo de Geissert (comunicación personal, noviembre de 2012). Aunque no se hizo una prueba formal de estabilidad de agregados, en campo se observó que en esta finca se presentaba una menor estabilidad de éstos, la cual pudiera estar relacionada con el contenido de materia orgánica. Luk (1979) indica que la materia orgánica es esencial para la formación y la estabilidad de los agregados, siendo requerido un contenido de materia orgánica mayor a 7%, y que la agregación del suelo es la variable que más explica la erosión. De acuerdo con Geissert (comunicación personal, noviembre de 2012), el contenido de 7% de materia orgánica se cumple en todas las fincas (7.2-11.7%), excepto en la Hilde (4.5%).

6.2 Efecto de los tratamientos

Contrario a lo esperado, no se registró una mayor tasa de erosión en las parcelas donde se aplicó el herbicida, respecto de las parcelas donde solo se realizó el chapeo. Una de las posibles razones para este resultado es que en los agroecosistemas estudiados la hierba se distribuye en un patrón heterogéneo de parches mezclados con hojarasca, relacionado a la heterogeneidad que provoca la sombra y el aspecto de la pendiente. En algunos casos la baja cobertura de hierba coincidió con las parcelas de medición correspondientes al tratamiento de chapeo, presentando condiciones similares a las de las parcelas donde se aplicó herbicida. De hecho, hubo parcelas de medición donde se presentó una mayor erosión con el tratamiento de chapeo, posiblemente porque en aquellas donde se aplicó el herbicida, se eliminó la parte aérea de la hierba, pero las raíces y materia orgánica permanecieron en el suelo, manteniendo de manera resiliente algunas de sus propiedades, relacionadas con la capacidad de infiltración, como son la porosidad y la capacidad de retención de agua (De Baets *et al.*, 2011).

El hecho de que el herbicida no haya tenido la incidencia esperada sobre la tasa de erosión en las fincas, podría deberse a que algunos de los efectos del herbicida incluyendo cambios en las propiedades biológicas y fisicoquímicas del suelo pueden ser acumulativos y manifestarse tras un periodo más largo, en escala de años (García-Pérez *et al.*, en prensa). Dichos autores encontraron que en el suelo de cafetales de sombra del centro de Veracruz, las aplicaciones repetidas de glifosato, durante 22 años, provocaron una disminución en la biodiversidad, la densidad y biomasa de las lombrices de tierra. Esto pudiera tener un efecto negativo sobre el flujo de agua en el suelo y por lo tanto favorecer la erosión, ya que las lombrices construyen galerías que sirven como conductores preferenciales en la infiltración del agua.

Para registrar todos los efectos de la aplicación de un herbicida sobre la tasa de erosión, en estas fincas, se requerirían estudios a una mayor escala temporal, como lo mostró el trabajo de Hashim *et al.* (1995). Dichos autores determinaron, en un sistema de cacao, las tasas de erosión de suelo bajo manejo de herbicida y bajo el manejo de chapeo, obteniendo resultados en el lapso de 2 años distintos a los presentes. Durante el primer año de tal estudio, donde aplicaron herbicida las tasas 26.52 t ha^{-1} , mientras que donde realizaron chapeo fue de 1.15 t ha^{-1} . En el segundo año del

estudio, esta diferencia entre los dos tratamientos fue mucho mayor, de 5 t ha⁻¹ donde se aplicó y 104 t ha⁻¹ donde se realizó chapeo.

6.3 Efecto de la cobertura al ras del suelo

En varios estudios de erosión, realizados bajo diversas condiciones y sistemas ambientales (Durán-Zuazo y Rodríguez-Pleguezuelo, 2008; Quiroz-Marin e Hincapie-Gómez, 2007), entre ellas los sistemas agroforestales como el cacao (Hashim *et al.*, 1995), se sustenta que la cobertura vegetal, sea de hierba, de hojarasca o rastrojo ayudan a reducir las tasas de erosión. En el presente estudio se comprobó que sólo la cobertura herbácea tuvo un efecto mitigador sobre la erosión hídrica. Es probable que la hojarasca no haya mostrado el mismo efecto que la hierba porque es una cobertura superficial inestable, que se remueve fácilmente con el viento, la lluvia o el paso de personas o animales. Si bien la hojarasca puede proteger al suelo del impacto de lluvia y actuar como obstáculo reductor de la velocidad de la escorrentía, la hierba resulta más efectiva pues puede cumplir con estas funciones, pero además sus raíces retienen el suelo a un nivel más profundo que la hojarasca, reducen la escorrentía de agua y favorecen la infiltración a través de la matriz del suelo (Durán-Zuazo y Rodríguez-Pleguezuelo, 2008).

Según Thornes (1990), en los bosques se logra un efecto mitigante de la escorrentía y de la erosión a partir de una cobertura herbácea de 30 o 40%. En los cafetales del estudio, las coberturas de hierba, la mayor parte del tiempo, se mantuvieron arriba de este porcentaje bajo el manejo de chapeo (Fig. 9), por lo que podrían propiciar condiciones favorables para la conservación del suelo de acuerdo al factor de vegetación.

6.4 Efecto de la cobertura arbórea

La cobertura arbórea presentó una correlación positiva con la tasa de erosión neta, siendo que a mayor sombra se presentó una mayor erosión, contrario a la hipótesis planteada en un inicio. Este resultado está en concordancia con lo observado por Gavito-Pardo *et al.* (2012), quienes registraron, en huertas de aguacate, mayores tasas de erosión donde se mantuvo un dosel más cerrado, que en aquellas donde se realizaron podas anuales del dosel. Esto se puede atribuir a que la sombra del dosel limitó el crecimiento de hierba y también a que las gotas de lluvia pueden

concentrarse en las hojas de los árboles y caer con una mayor energía y por lo tanto, acelerar el proceso de erosión si el suelo se encuentra desnudo.

Cabe considerar la alta variación en nuestros resultados y que se restringen a cuatro sitios de estudio, por lo que éstos deben considerarse como preliminares. Para obtener información más contundente serían necesarios estudios a largo plazo y con un mayor número de repeticiones, de tal forma que se pueda representar la complejidad de estos agrosistemas. También harían falta estudios que analicen en qué condiciones de sombra ocurre este efecto de incremento de la erosión; por ejemplo, si es con aquellas especies de árboles de gran altura o con las que presentan hojas de mayor tamaño, así como estudios sobre el efecto que tiene la sombra sobre la cobertura de hierbas, considerando que existen especies con bajos requerimientos de luz solar que permiten la conservación del suelo a pesar de la cobertura arbórea.

No podemos olvidar que la cobertura arbórea ofrece muchos otros beneficios a las fincas, como reducir el estrés de los cafetos y por lo tanto la afectación por plagas, aminorar el impacto de cambios climáticos, ser fuente de materia orgánica y de otros productos (Beer *et al.*, 1997), además de ser un albergue de la biodiversidad (Manson *et al.*, 2008).

6.5 Efecto de la densidad de cafetos sobre la erosión

Con relación a la influencia de la densidad de cafetos sobre la erosión, se esperaba que los arbustos actuaran, al igual que los árboles, como protectores del suelo, ante la energía del impacto de las gotas de lluvia. Sin embargo, en los resultados no se observó ninguna influencia de la densidad de cafetos sobre la erosión. Se requieren más pruebas para encontrar resultados análogos a los de Pavan *et al.* (1999), que encontraron que en el transcurso de 15 años, se incrementó el contenido de carbono orgánico y otras propiedades relacionadas con la fertilidad del suelo, hubo mayor presencia de micorrizas arbusculares y menor erosión del suelo, en fincas con mayor densidad (7143 cafetos/ha) que en fincas con menor de densidad (893 cafetos/ha).

Es probable que para detectar diferencias de tasas de erosión entre parcelas con distinta densidad de cafetos, se deba tener un tamaño de parcela mayor y un mejor control sobre las características de los cafetos, sobre todo el tamaño y las variedades.

6.6 Método de medición con estacas

El método de medición con estacas generalmente es utilizado en sitios áridos o en parcelas experimentales donde se mantiene el suelo desnudo. Incluso, en el trabajo de Pizarro y Cutiño (2002), que expone más a detalle cómo llevar a cabo este método, se recomienda eliminar la cobertura vegetal para obtener el dato de la máxima tasa de erosión potencial, dejando de lado el efecto que naturalmente tiene ésta sobre la erosión.

En el presente estudio este método fue apropiado para dar respuesta a las hipótesis planteadas, permitió tomar mediciones sin necesidad de visitas frecuentes y facilitó la instalación y mantenimiento en campo de las parcelas de medición y de las estacas. Sin embargo, hubo algunas dificultades durante la toma de decisiones acerca del diseño y la toma de datos. Una de las principales fue definir la medición que mejor representa a la erosión del suelo, tras encontrar que las dos mediciones hechas resultaron ser diferentes, la registrada en la parte alta, la de la parte baja y el promedio de éstas, al punto de que dependiendo de esta decisión se pudiera reportar erosión o sedimentación en algunas fincas. La parte alta de la estaca, claramente mostró una tendencia a la sedimentación, mientras que en la parte baja tendió más hacia la erosión. Es probable que estos registros de sedimentación se hubieran reducido si la parcela hubiera tenido una barrera física en la parte superior de ésta, sin embargo, no se recomienda hacer esto debido a que altera el flujo de la escorrentía que baja por la ladera y por lo tanto los resultados no corresponderán a la erosión real de ese sitio (Brea y Balocchi, 2010). Además hay que asumir que en el terreno de estudio ocurren ambos procesos y que esto lo detectamos gracias al método de estacas, pero resulta difícil saber desde qué distancia es arrastrado el suelo.

Hace falta una estandarización más precisa del método, en cuanto a dimensiones de parcelas, toma de medición y diseño para la colocación de estacas. Asimismo, los datos obtenidos con el método descrito en el presente trabajo, presentaron una alta variabilidad debido a la a la gran heterogeneidad dentro y entre los sitios de estudio, lo cual indica una deficiencia en el número de repeticiones en todos los niveles: estacas, bloques y fincas. El método de estacas mide la erosión de forma muy localizada y su precisión depende en gran parte del número de estacas con el que se puede trabajar, ya que a mayor número de estacas, mejor estarán representadas las parcelas. Si bien Pizarro y Cutiño (2002) recomiendan que, considerando una varianza máxima y un error de

muestreo de 5%, el número óptimo de estacas para parcelas de 10 x 1.2 de ancho, es de 140, esto puede variar mucho según las características y heterogeneidad del terreno, incluso teniendo la capacidad de cubrir costos y sobre todo el esfuerzo muestral que se requiera. Por otro lado, el factor tiempo también fue determinante en este trabajo, refiriéndose a la gran movilización de suelo que se presentó en algunos sitios, expresándose en muchas de las estacas como una sedimentación. Queda la duda de cómo respondería el método de estacas en las mismas condiciones, pero llevándose a cabo en un plazo mayor de tiempo, al menos durante dos años, pues resultaría muy interesante conocer cómo ocurre a través del tiempo, el proceso del arrastre del suelo, desde que se desprende en un punto hasta que se deposita en otro. También resultaría útil registrar el proceso de erosión a lo largo de toda una ladera, para conocer cómo afecta la ubicación de las parcelas sobre la ladera dicho proceso. Pues como reportan Wilcox *et al.* (2003), la escala de las parcelas de medición es sumamente importante en los resultados de la escorrentía y de la erosión, siendo que en parcelas de menor tamaño (1x8 m), la tasa de erosión y la escorrentía fueron mayores, a comparación de la escala de ladera (30x100 m). Esto debido a la complejidad jerárquica que presentan los procesos ecohidrológicos, a mayor escala, existe mayor posibilidad de infiltración y de almacenaje de agua debido a los parches de vegetación, a comparación de un área de menor tamaño.

Uno de los factores determinantes en las mediciones registradas, fue la presencia de agregados de distintos tamaños sobre la medición, como se mostró en la Figura 6, pues la presencia de agregados acumulados en la parte alta de la estaca podía aportar hasta 3 cm de sedimentación en los resultados. Sin embargo, no se encontraron otros estudios que mencionan la presencia de agregados y su importancia en las mediciones con el método de estacas.

CONCLUSIONES

1. En promedio, las laderas con policultivos de café de sombra, con suelo de tipo Acrisol, presentaron una tasa de erosión moderada de $33.5 (\pm 38.6) \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.
2. Se observó un alto nivel de variación en las variables medidas dentro y entre sitios, lo cual indica que los cafetales son un sistema heterogéneo y complejo en el que, para su estudio, se requiere un mayor número de repeticiones.
3. No hubo diferencias entre las tasa de erosión de suelo medidas bajo los tratamientos de herbicida y chapeo, durante el periodo de un año.

4. La cubierta de hierba presentó una correlación negativa sobre las tasas de erosión del suelo.
5. La sombra puede limitar el crecimiento de la hierba y así incrementar las tasas de erosión, pero no hay que olvidar que es un estrato que ofrece muchos otros servicios beneficios, no incluidos en el presente trabajo.
6. Los resultados apoyan la idea de que los factores más importantes para mitigar la erosión son la cobertura arbórea y herbácea.
7. La densidad de cafetos dentro de las parcelas de medición no tuvo un efecto significativo sobre la erosión.
8. El método de estacas es un método viable para medir la erosión hídrica en cafetales de sombra que arroja resultados tanto del proceso de erosión como de sedimentación.

7.1 Recomendaciones para futuros estudios

Respecto al método:

1. Tomar las mediciones en el lado de las estacas que apunta pendiente abajo (si se encuentran sobre una pendiente) y señalar los detalles del diseño y del proceso de medición, pues la experiencia en cada estudio es una aportación para el mejoramiento y estandarización del método.
2. Elegir áreas homogéneas en cuanto a cobertura de hierba para la instalación de parcelas de medición, al menos dentro de los bloques del diseño experimental.
3. Aprovechar el potencial que tiene el método para la realización de estudios espaciales en los que se puede analizar la influencia de varios elementos sobre la erosión y sedimentación.
4. Dado la alta variación observada, se recomienda mayor replicación y trabajos a escalas temporales y espaciales mayores cuando se está utilizando el método de estacas para medir tasas de erosión en cafetales.
5. Hace falta trabajo para poder determinar la escala espacial mínima de estudio de erosión en estos policultivos de café de sombra.

Respecto a las líneas de investigación:

1. Estudiar las distancias de desplazamiento del suelo o agregados de suelo de distintos tamaños bajo distintas condiciones.
2. Estudiar la influencia de estratos arbóreos con diferentes características en cuanto a tamaño, cobertura de dosel y hojas, sobre la vegetación y la erosión.
3. Comparar los diferentes métodos de medición de erosión de suelos, los cuales son escasos para saber qué tan confiables son los métodos al arrojar resultados iguales.
4. Estudiar el impacto del herbicida sobre la erosión y sobre otras propiedades del suelo en un periodo mayor, a escala espacial y con distintas concentraciones.
5. Evaluar el impacto de cambios en la fertilidad de suelos debido a la erosión sobre la cantidad y calidad del café producido con el fin de estimar el costo del mal manejo de los cafetales.

BIBLIOGRAFÍA

- Afandi, T. K. Manik, B. Rosadi, M. Utomo, M. Senge, T. Adachi, Y. Oki. 2002. Erosion under coffee trees with different weed managements in humid tropical hilly area of Lampung, South Sumatra, Indonesia. *Journal of the Japanese Society of Soil Physics*. 91:3-14.
- Almoza, Y., H. Medina, W. Schiettecatte, G. Alonso y M. E. Ruiz. 2008. El uso de datos pluviométricos para la determinación del factor erosividad de las precipitaciones en el modelo RUSLE. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 17:38-43.
- Arellano, R. 2000. Pérdida de suelo y nutrientes en agroecosistemas de café en la subcuenca del río Castán, Trujillo-Venezuela. *Forest* 44(2):79-86.
- Ataroff, M. y M. Monasterio. 1997. Soil erosion under different management of coffee plantations in the Venezuelan Andes. *Soil Technology* 11:95-108.
- Barthès, B. y E. Roose. 2002. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena* 47:133-149.
- Beer, J., R. Muschler, D. Kass y E. Somarriba. 1997. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry systems* 38:139-164.
- Boege, E., H. García y P. Gerez. 1995. Las Sierras de Veracruz y las opciones de manejo de sus recursos naturales. Alternativas al manejo de laderas en Veracruz. SEMARNAP, Fundación Friedrich Ebert (FES). México. 9-31.
- Boix-Fayos, C., M. Martínez-Mena, E. Arnau-Rosalén, A. Calvo-Cases, V. Castillo y J. Albaladejo. 2006. Measuring soil erosion by field plots: understanding the sources of variation. *Earth-Science Reviews* 78:267-285.
- Boix-Fayos, C., M. Martínez-Mena, A. Calvo-Cases, E. Arnau-Rosalén, J. Albaladejo y V. Castillo. 2007. Causes y underlying processes of measurement variability in field erosion plots in Mediterranean conditions. *Earth Surface Processes and Landforms* 32:85-101.
- Brea, J. D. y F. Balocchi. 2010. Procesos de erosión-sedimentación en cauces y cuencas. UNESCO-ISI-AZALAC-Universidad de Talca-INA-EIAS. Documentos técnicos 1:138.
- Bruijnzeel, L. A. 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees?. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 104(1):185-228.
- Cayuela, L. 2012. Modelos lineales mixtos (LMM) y modelos lineales generalizados mixtos (GLMM) en R. Universidad Rey Juan Carlos. España. 65 pp.

- Cerdã, A. y Doerr, S. 2005. The influence of vegetation recovery on soil hydrology and erodibility following fire: an eleven-year research. *International Journal of Wildland Fire* 14(4):423-437.
- Cerdan-Cabrera, C. R., S. G. Rebolledo, B. Rapidel y F. Sinclair. 2012. Local knowledge of impacts of tree cover on ecosystem services in smallholder coffee production systems. *Agricultural Systems* 110:119-130.
- Conagua (Comisión Nacional del Agua). 2011. Situación de los Recursos hídricos. Estadísticas del agua en México, edición 2011. Capítulo 2. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 17-42.
- Contreras, A. y G. Hernández. 2005. Estudio de la biodiversidad de los cafetales y su contribución a la sustentabilidad. Proyecto Biocafé SEMARNAT-2002-C01-0194. Informe. 22 p. Consultado el 23/03/2013, en: <http://www3.inecol.edu.mx/biocafe/ARCHIVOS/investigadores/hach/articulos/Contreras-Hernandez-2005-ACH.pdf>
- Cotler, H., A. Garrido, V. Bunge y M. L. Cuevas. 2010. Las cuencas hidrográficas de México: Priorización y toma de decisiones. Las cuencas hidrográficas de México: diagnóstico y priorización, SEMARNAT e INECC. 210-215. Consultado el 3/10/2013, en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/639/priorizacion.pdf>
- Cotler, H., López, C. A. y Martínez-Trinidad, S. 2011. ¿Cuánto nos cuesta la erosión de suelos? Aproximación a una valoración económica de la pérdida de suelos agrícolas en México. 31-43. *Investigación ambiental*. INE. México. Consultado el 29/11/2012, en: <http://www.revista.ine.gob.mx/article/view/134/102>
- Craswell, E. T., A. Sajjapongse, D. J. B. Howlett y A. J. Dowling. 1998. Agroforestry in the management of sloping lands in Asia and the Pacific. *Tropical Agroforestry Research*. Springer 38:121-137.
- Crawley, M. J. 2007. *The R book*. John Wiley & Sons. Inglaterra. 941 pp.
- CSVA (Consejo del Sistema Veracruzano del Agua). 2005. Programa hidráulico estatal. Consultado el 11/09/2013, en: http://imcas-x.org/wp-content/uploads/2011/09/Programa_Hidr%C3%A1ulico_Estatal.pdf
- De Baets, S., J. Poesen, J. Meersmans y L. Serlet. 2011. Cover crops and their erosion-reducing effects during concentrated flow erosion. *Catena* 85:237-244.

- Durán-Zuazo, V. H. y C. R. Rodríguez-Pleguezuelo. 2008. Soil-erosion y runoff prevention by plant covers. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 28:65-86.
- Eswaran, H., R. Lal y P. F. Reich. 2001. Land degradation: an overview. En Bridges, E.M., I.D. Hannam, L.R. Oldeman, F.W.T. Pening de Vries, S.J. Scherr, and S. Sompatpanit (eds.). *Responses to Land Degradation. Proc. 2nd. International Conference on Land Degradation and Desertification*, Khon Kaen, Thailand. Oxford Press. India. 20-35. Consultado el 20/02/2013, en: <http://soils.usda.gov/use/worldsoils/papers/land-degradation-overview.html>
- Fischersworing Homberg, B. y R. Robkamp Ripken. 2003. Guía para la cafcultura ecológica. 3ª Ed., Editorial López. Alemania-Colombia. 152 pp.
- Folk, R. L. 1951. A comparison chart for visual percentage estimation. *Journal of Sedimentary Research*. 21(1): 32-33.
- Gail, M., K. Krickeberg, J. Samet, A. Tsiatis y W. Wong. 2007. *Statistics for biology and health*. Springer. Estados Unidos. 615 pp.
- García, E. 1989. Modificaciones al Sistema de clasificación de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 247 pp.
- García-Chevesich, P. A. 2009. Erosion processes and control. The University of Arizona. Faculty of the Department of Agricultural and Biosystems Engineering. Tesis doctoral. EUA. 516 pp.
- García-Estringana, P., Alonso-Blázquez, N., Marques, M. J., Bienes, R., González-Andrés, F. y Alegre, J. 2013. Use of Mediterranean legume shrubs to control soil erosion and runoff in central Spain. A large-plot assessment under natural rainfall conducted during the stages of shrub establishment and subsequent colonization. *Catena* 102:3-12.
- García-Pérez, J. A., E. Alarcón-Gutiérrez, Y. Perroni e I. Barois. En prensa. Earthworm communities and soil properties in shaded coffee plantations with and without application of glyphosate. *Applied Soil Ecology*.
- Gavito-Pardo, M. E., M. Astier-Calderón, R. Ayala-Barajas, E. Ramírez-García y J. Martínez-Cruz. 2012. Evaluación del impacto ecológico del cultivo de aguacate a nivel regional y de parcela en el Estado de Michoacán: validación de indicadores ambientales en los principales tipos de producción. Informe final, etapa 2. CIEco, UNAM. México. 92 pp.

- Geissert, D. y A. Ibáñez. 2008. Calidad y ambiente físico-químico de los suelos. 213-221 pp. Editores: Manson, R. H., V. Hernández-Ortiz, S. Gallina, and K. Mehlreter. Agroecosistemas Cafetaleros de Veracruz: Diversidad, Manejo y Conservación. Instituto de Ecología A. C. (INECOL) e INE-SEMARNAT. México. 348 pp.
- Gopinathan, R. y C. Sreedharan. 1989. Soil erosion as influenced by rainfall erosivity under different agroforestry systems. En: Reifsnnyder, W. S. y T. O. Barnhofer (Eds.) *Meteorology and Agroforestry*, ICRAF. Kenya. 407–418.
- Goudie, A. S., M. Anderson, T. Burt, J. Lewin, K. Richards, B. Whalley y P. Worsley. 1990. *Geomorphological techniques*. British Geomorphological Research Group. Unwin Hyman. Inglaterra. 251-256 p.
- Guerra, J. A., C. D. Arbelo, C. M. Armas, A. R. Rodríguez, y J. L. Mora. 2003. Erosión diferencial de Andosoles y Aridisoles en dos zonas climáticas de la isla de Tenerife. *Edafología*. Sociedad Española de la Ciencia del Suelo 10:229-237.
- Hartanto, H., R. Prabhu, A. S. E. Widayat y C. Asdak. 2003. Factors affecting runoff y soil erosion: plot-level soil loss monitoring for assessing sustainability of forest management. *Forest Ecology and Management* 180:361-374.
- Hashim, G. M., C. A. Ciesiolka, W. A. Yusoff, A. W. Nafis, M. R. Mispan, C. W. Rose y K. J. Coughlan. 1995. Soil erosion processes in sloping land in the east coast of Peninsular Malaysia. *Soil Technology* 8(3): 215-233.
- Hernández-Martínez, G. 2008. Clasificación agroecológica. 15-34 pp. R. H. Manson, V. Hernández-Ortiz, S. Gallina, and K. Mehlreter (Eds.). *Agroecosistemas Cafetaleros de Veracruz: Biodiversidad, Manejo y Conservación*. Instituto de Ecología, A. C. (INECOL) y Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). México. 348 pp.
- Hudson, N. W. 1997. Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía. *Boletín de suelos de la FAO*. Food Agriculture Organization. Consultado el 13/09/2012, en: <http://www.fao.org/docrep/t0848s/t0848s00.htm>
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2007. Eric III: Extractor rápido de información climatológica. Servicio Meteorológico Nacional. SEMARNAT. México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2007. VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal. Aspectos metodológicos y principales resultados. Consultado el 22/02/2013, en:

http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/agro/ca2007/resultados_agricola/default.aspx

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2009. Totutla, Veracruz de Ignacio de la Llave. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Consultado el 22/02/2013, en: <http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/30/30188.pdf>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 1988. Atlas nacional del medio físico. México.
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). 2013. Consultado el 27/06/2013, en: <http://clima.inifap.gob.mx/redinifap/estaciones.aspx>
- Juo, A. S. R. y K. Franzluebbers. 2003. Tropical soils: properties y management for sustainable agriculture. Oxford University Press, EUA. 281 pp.
- Keay-Bright, J. y J. Boardman. 2009. Evidence from field-based studies of rates of soil erosion on degraded land in the central Karoo, South Africa. *Geomorphology* 103:455-465.
- Lal, R. 1983. Soil erosion in the humid tropics with particular reference to agricultural land development y soil management. *International Association of Scientific Hydrology*. 140:221-239.
- Lal, R. 1998. Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. *Critical reviews in Plant Sciences* 17:319-464.
- Levia, D. F. y E. E. Frost. 2003. A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems. *Journal of Hydrology*. 274:1-29.
- Luk, S. H. 1979. Effect of soil properties on erosion by wash and splash. *Earth Surface Processes and Landforms* 4(3):241-255.
- Manson, R. 2004. Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques de México. *Madera y Bosques* 10:3-20.
- Manson, R. H., V. J. Sosa, H. A. Contreras, V. Hernández-Ortíz, S. Gallina, y K. Mehltreter. 2008. Efectos del manejo sobre la biodiversidad: síntesis y conclusiones. R. H. Manson, V. Hernández-Ortiz, S. Gallina, and K. Mehltreter (Eds.). *Agroecosistemas Cafetaleros de Veracruz: Biodiversidad, Manejo y Conservación*. Instituto de Ecología, A. C. (INECOL) y Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). México. 348 pp.

- Marín, C. y G. Desir. 2003. Comparación entre distintas técnicas para la determinación de la pérdida de suelo. Bardenas Reales (Navarra). *Edafología*. 10(3):215-225.
- Martínez, M. A., M. Evangelista, V., F. Basurto, M. Mendoza y A. Cruz-Rivas. 2007. Flora útil de los cafetales en la Sierra Norte de Puebla, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 78(1):15-40.
- McHugh, M., M. Clarke, J. Duzant, R. Morgan y J. Rickson. 2005. Soil Erosion and Control Practices. *Water Encyclopedia*. John Wiley & Sons Inc. 565-570.
- Mestries-Benquet, F. 2003. Crisis cafetalera y migración internacional en Veracruz. *Migraciones internacionales* 2(2): 121-148.
- Moguel, P. y V. Toledo. 1999. Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. *Conservation Biology* 13(1):11-21.
- Mohammad, A. G. y Mohammad A. A. 2010. The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses. *Catena* 81(2):97-103.
- Morgan, R. P. C., J. N. Quinton, R. E. Smith, G. Govers, J. W. A. Poesen, K. Auerswald, G. Chisci, D. Torri y M. E. Styczen. 1998. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms* 23:527-544.
- Negrete-Yankelevich, S., I. E. Maldonado-Mendoza, J. O. Lázaro-Castellanos, E. Sangabriel-Conde y J. C. Martínez- Álvarez. 2013. Arbuscular mycorrhizal root colonization and soil P availability are positively related to agrobiodiversity in Mexican maize policultures. *Biology and Fertility Soils* 49:201-212.
- Oldeman, L. R. 1994. Global extent of soil degradation. Soil resilience and sustainable land use. *ISRIC Bi-Anual Report 1991-1992*. 19-36. Consultado el 14/05/2013, en http://library.wur.nl/isric/fulltext/isricu_i26803_001.pdf
- Pando-Moreno, M., M. Gutiérrez, A. Maldonado, J. L. Palacio, y A. E. Estrada. 2003. Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica. *Boletín del Instituto de Geografía. UNAM*. 51:23-26.
- Pavan, M. A., J. C. D. Chaves, R. Siqueira, A. Androcioli, A. Colozzi y E. L. Balota. 1999. High coffee population density to improve fertility of an Oxisol. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 34:459-465.

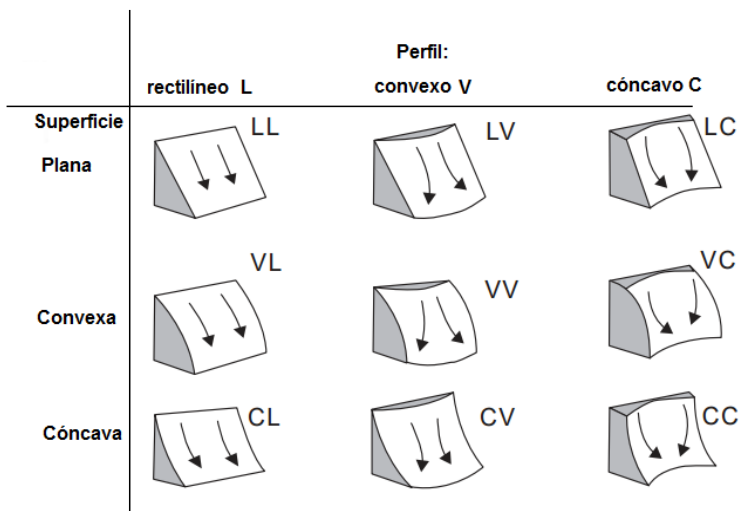
- Pereyra-Díaz, D., L. Gómez-Romero y F. Loeza-Hernández. 2005. Pérdida de suelo por erosión hídrica. 61-84. Rivera-Trejo, F., A. Gutierrez-López, R. Val-Segura, R. Mejía-Zermeño, P. Sánchez-Ruiz, F. J. Aparicio-Mijares, I. I. Díaz-Flores (Eds.). La Medición de Sedimentos en México. IMTA-UJAT, Morelos-Tabasco. México. 318 pp.
- Pérez-Nieto, J., E. Valdés, M. Hernández y V. Ordaz. 2005. Lluvia, escurrimiento superficial y erosión del suelo en sistemas agroforestales de café bajo sombra. *Agrociencia* 39 (4):409-418.
- Perfecto, I., R. A. Rice, R. Greenberg y M. E. Van der Voort. 1996. Shade coffee: a disappearing refuge for biodiversity. *BioScience* 46:598-608.
- Pidwirny, M. (2006). Erosion and Deposition. *Fundamentals of Physical Geography*. 2ª Edición. Consultado el 20/06/2013, en: <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/10w.html>
- Pimentel, D. y N. Kounang. 1998. Ecology of soil erosion in ecosystems. *Ecosystems* 1:416-426.
- Pizarro, R., C. Morales, L. Vega, R. Valdés, C. Olivares y F. Balocchi. 2010. Evaluación de la erosión hídrica superficial en zonas áridas y semiáridas de Chile Central. *Aqua-LAC. UNESCO*. 2 (2):1-11.
- 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. España*. 165-170.
- Rai, K. D., W. A. Raney y H. B. Vanderford. 1953. Some physical factors that influence soil erosion and the influence of aggregate size and stability on growth of tomatoes. *Soil Science Society of America Journal*. 18(4):486-489.
- Quiroz-Marín, T. y E. Hincapié-Gómez. 2007. Pérdidas de suelo por erosión en sistemas de producción de café con cultivos intercalados. *Cenicafé* 58. Colombia. 3:227-235.
- Renard, K. G. y Foster, G. R. 1983. Soil conservation: principles of erosion by water. *Dryland agriculture. Agronomy Monograph*. 23, 156-176.
- Renard, K. G., G. R. Foster, G. A. Weesies y J. P. Porter. 1991. RUSLE: Revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation* 46:30-33.
- Richards, S.A. 2008. Dealing with overdispersed count data in applied ecology. *Journal of Applied Ecology* 45:218-227.

- 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 Latinoamericana* 26:376-376.
- SAGARPA. 2012. Cierre de la producción agrícola por estado del cultivo café cereza del estado de Veracruz. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Consultado el 14/08/2013, en :
http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=351
- SEFIPLAN (Secretaría de Finanzas y Planeación del Estado de Veracruz). 2013. Sistema de información municipal: Cuadernillos Municipales: Tenampa. Consultado el 14/09/2013, en: <http://www.veracruz.gob.mx/finanzas/files/2013/04/Tenampa.pdf>
- SEFIPLAN (Secretaría de Finanzas y Planeación del Estado de Veracruz). 2013. Sistema de información municipal: Cuadernillos Municipales: Totutla. Consultado el 14/09/2013, en: <http://www.veracruz.gob.mx/finanzas/files/2013/04/Totutla.pdf>
- SEFIPLAN (Secretaría de Finanzas y Planeación del Estado de Veracruz). 2013. Sistema de información municipal: Cuadernillos Municipales: Zentla. Consultado el 14/09/2013, en: <http://www.veracruz.gob.mx/finanzas/files/2013/04/Zentla.pdf>
- SEMARNAT. 2008. Degradación de suelos: superficie afectada por procesos, tipos y niveles de degradación del suelo (2002). Compendio de estadísticas ambientales 2008. Consultado el 20/05/2013, en: http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/resumen_2009/03_suelos/cap3_3.html
- SEMARNAT y Colegio de Postgraduados. 2003. Evaluación de la degradación de los suelos causada por el hombre en la República Mexicana. Escala 1:250000. México. Consultado el 18/04/2013, en:
http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/Documents/pdf/cap_3_suelos.pdf
- SEMARNAT y Universidad Autónoma de Chapingo. 2002. Evaluación de la pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica en la República Mexicana. Escala 1:1000000. Consultado el 20/01/2013 en: http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/03_suelos/cap3_2.html
- Schumm, S. A. 1964. Seasonal variations of erosion rates and processes on hillslopes in western Colorado. *Zeitschrift fur Geomorphologie Suppl.* 5: 215-238.
- Shi, Z., A. Wen, X. Zhang y D. Yan. 2011. Comparison of the soil losses from Be⁷ measurements and the monitoring data by erosion pins and runoff plots in the Three Gorges Reservoir region, China. *Applied Radiation and Isotopes* 69(10):1343-1348.

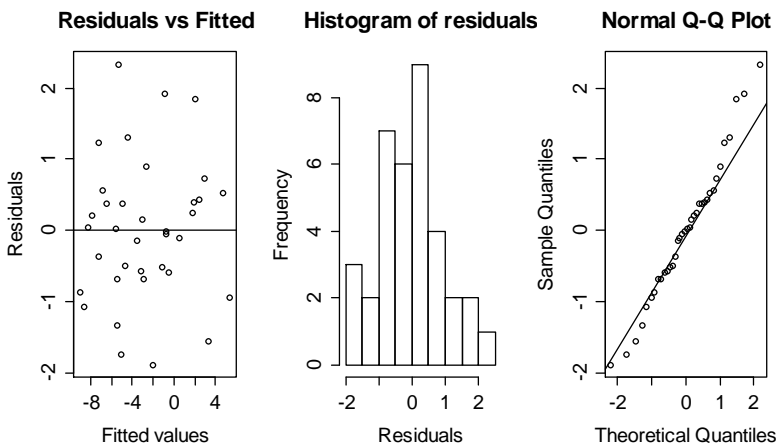
- Sidle, R. C., A. D. Ziegler, J. N. Negishi, A. R. Nik, R. Siew y F. Turkelboom. 2006. Erosion processes in steep terrain: Truths, myths, and uncertainties related to forest management in Southeast Asia. *Forest Ecology and Management* 224: 199-225.
- Sirvent, J., G. Desir, M. Gutierrez, C. Sancho y G. Benito. 1997. Erosion rates in badland areas recorded by collectors, erosion pins and profilometer techniques (Ebro Basin, NE-Spain). *Geomorphology* 18:61-75.
- Soracco, C. G. 2005. Relación entre la conductividad hidráulica saturada y la densidad aparente en tres situaciones de manejo contrastantes. En: Evaluación de parámetros y procesos hidrológicos en el suelo. VII Escuela Latinoamericana de Física de Suelos. Chile. 34-38.
- Soto, M. 1986. Localidades y climas del Estado de Veracruz. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos. México.
- Soto, M. y E. García. 1989. Atlas climático del estado de Veracruz. Instituto de Ecología A. C. México. 125 pp.
- Soto-Pinto, L., I. Perfecto, J. Castillo-Hernandez, y J. Caballero-Nieto. 2000. Shade effect on coffee production at the northern Tzeltal zone of the state of Chiapas, Mexico. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 80:61-69.
- Thornes, J. B. 1990. *Vegetation and erosion: Processes and environments*. John Wiley & Sons. Inglaterra. 518 pp.
- Toy, T. J., G. R. Foster, y K. G. Renard. 2002. *Soil erosion: processes, prediction, measurement and control*. John Wiley & Sons. EUA. 338 pp.
- Trimble, S. W. 1990. Geomorphic effect of vegetation cover and management: Some time and space considerations in prediction of erosion and sediment yield. 55-65 p. Editores: Thornes, J. B. *Vegetation and Erosion: Processes and environments*. John Wiley & Sons. Inglaterra. 518 pp.
- Varangis, P., P. Siegel, B. Lewin y D. Giovannucci. 2002. La crisis cafetalera: Efectos y estrategias para hacerle frente. Consultado el 12/10/2013, en: <http://www.comitedecafeteroscaldas.org/static/files/4.crisiscafetaleraefectos.pdf>
- Vásquez, A. y M. M. Tapia. 2011. Cuantificación de la erosión hídrica superficial en las laderas semiáridas de la Sierra Peruana. *Revista INGENIERÍA UC*. Universidad de Carabobo. Venezuela. 18(3):42-50.

- Viles, H. A. 1990. The agency of organic beings: A selective review of recent work in biogeomorphology. 5-24. Editores: Thornes, J. B. Vegetation and Erosion: Processes and environments. John Wiley & Sons. Inglaterra. 518 pp.
- Wilcox, B. P., D. D. Breshears, C. D. Allen. 2003. Ecohydrology of a resource-conserving semiarid woodland: effects of scale and disturbance. Ecological Society of America. 73(2): 223-239.
- Wisocky, D. A., P. J. Schoeneberger, H. E. LaGarry. 2000. Geomorphology of soil landscapes. Ed. M. Sumner. CRC handbook of soil science. Estados Unidos. Consultado el 10/11/2013, en: [ftp://ftp-fc.sc.egov.usda.gov/NSSC/training/SGI_Course/reading_and_references/Referece%20PDF's%20\(rev%202012\)/GeomChap2011.pdf](ftp://ftp-fc.sc.egov.usda.gov/NSSC/training/SGI_Course/reading_and_references/Referece%20PDF's%20(rev%202012)/GeomChap2011.pdf)

ANEXOS



Anexo 1. Forma de la ladera según su perfil y su superficie. Las flechas muestran el flujo de agua sobre la superficie (Wisocky *et al*, 2000)



Anexo 2. Distribución de las residuales del modelo lineal mixto (M3, con sombra de julio) como una muestra de homocedasticidad.

Anexo 3. Script de R para la realización del modelo lineal mixto.

```
# Modelo saturado:
```

```
M<-
```

```
lme((EN_BAJA_MM_MAR)~Tratamiento+CH_MAR+HOJ_MAR+SD_MAR+SOMBRA_JUL  
+NUM_CAF,random= ~1|Finca/BLOQUE,na.action= na.omit,method= "ML")  
anova(M)
```

```
# Simplificación del modelo
```

```
M2<-update(M,~-Tratamiento)
```

```
anova(M,M2)
```

```
anova(M2)
```

```
M3<-update(M2,~-NUM_CAF)
```

```
anova(M2,M3)
```

```
anova(M3)
```

```
M4<-update(M3,~-HOJ_MAR)
```

```
anova(M4,M3)
```

```
anova(M4)
```

```
M5<-update(M4,~-SD_MAR)
```

```
anova(M4,M5)
```

```
anova(M5)
```

```
M6<-update(M4,~.+NUM_CAF)
```

```
anova(M4,M6)
```

```
M7<-update(M4,~.+HOJ_MAR)
```

```
anova(M4,M7)
```

```
anova(M7)
```

```
M8<-update(M4,~.+Tratamiento)
```

```
anova(M4,M8)
```

```
anova(M8)
```

```
#Modelo saturado con interacciones entre las coberturas:
```

```
M9<-
```

```
update(M4,~.+CH_MAR*SD_MAR+CH_MAR*SOMBRA_JUL+SD_MAR*SOMBRA_MAR)
```

```
anova(M9,M4)
```

```
anova(M9)
```

```
M10<-update(M9,~-SD_MAR:SOMBRA_MAR)
```

```
anova(M9,M10)
```

```
anova(M10)
```

```
M11<-update(M10,~-CH_MAR:SD_MAR)
```

```
anova(M11,M10)
```

```
anova(M11)
```

```
M12<-update(M11,~-CH_MAR:SOMBRA_MAR)
```

```
anova(M11,M12)
```

```
anova(M12)
```

```
M13<-update(M12,~-SD_MAR)
```

```
anova(M13,M12)
```

```
anova(M12)
```

```
# Modelo saturado con interacciones de cada cobertura con el tratamiento:
```

```
M16<-
```

```
lme((EN_BAJA_MM_MAR)~Tratamiento*CH_MAR+Tratamiento*HOJ_MAR+Tratamiento*S  
D_MAR+Tratamiento*NUM_CAF+Tratamiento*SOMBRA_MAR,random=  
~1|Finca/BLOQUE,na.action= na.omit,method= "ML")#ml= maximum likelihood
```

```
anova(M16)
```

```
M17<-update(M16,~-Tratamiento:SD_MAR)
```

```
anova(M17,M16)
```

```
anova(M17)
```

```
M18<-update(M17,~-Tratamiento:CH_MAR)
```

```
anova(M18,M17)
```

```
anova(M17)
```

```
M19<-update(M17,~-Tratamiento:SOMBRA_MAR)
```

```
#Selección del modelo simplificado (en negrillas)
```

```
AIC(M,M2,M3,M4,M5,M8,M9,M10,M11,M12,M16,M17)
```

Modelo	AIC	Δ AIC
M	242.8990	9
M2	239.0343	6
M3	237.0591	4
M4	235.0811	2
M5	236.6855	3
M8	238.9245	6
M9	241.2356	8
M10	239.2509	6
M11	237.2509	4
M12	236.0141	3
M16	235.8199	3
M17	233.1151	0

```
#Residuales del modelo seleccionado:
```

```
Res<-residuals(M3,type= "normalized")
```

```
Fit<-fitted(M3)
```

```
par(mfrow= c(1,3))
```

```
plot(Res~Fit,xlab= "Fitted values",ylab= "Residuals",main= "Residuals vs Fitted")
```

```
abline(h= 0)
```

```
hist(Res,main= "Histogram of residuals",xlab= "Residuals")
```

```
qqnorm(Res)
```

```
qqline(Res)
```

```
shapiro.test(Res)
```

```
Proceso para graficar:
```

```
M3<-
lme((EN_BAJA_MM_MAR)~CH_MAR+HOJ_MAR+SD_MAR+SOMBRA_JUL,random=
~1|Finca/BLOQUE,na.action= na.omit,method= "ML")
```

```
#Gráficas
```

```
##### Cobertura de Hierba #####
```

```
par(mfrow= c(1,1),mar= c(5,5,5,5))
plot(EN_BAJA_MM_MAR~CH_MAR,type= "null", ylab= "Erosión neta (mm/año)", xlab=
"Cobertura de hierba (%)",cex.lab= 1,cex.axis= 1,las= 1,ylim= c(-20,30))
points((EN_BAJA_MM_MAR)~CH_MAR,cex= 0.3)
points((EN_BAJA_MM_MAR)[Tratamiento= = "c"]~CH_MAR[Tratamiento= = "c"],col=
"gray80",pch= 19,cex= 0.8)
points((EN_BAJA_MM_MAR)[Tratamiento= = "ch"]~CH_MAR[Tratamiento= = "ch"],col=
"gray52",pch= 19,cex= 0.8)
points((EN_BAJA_MM_MAR)[Tratamiento= = "h"]~CH_MAR[Tratamiento= = "h"],col=
"gray14",pch= 19,cex= 0.8)
SEQ <- seq(0,100, length = 30)
ND <- data.frame(CH_MAR = SEQ,HOJ_MAR= mean(HOJ_MAR),SOMBRA_JUL=
mean(SOMBRA_JUL),SD_MAR= mean(SD_MAR),BLOQUE= "M1",Finca= "H")
PRED1 <- predict(M3, ND, se = TRUE)
ND <- data.frame(CH_MAR = SEQ, HOJ_MAR= mean(HOJ_MAR),SOMBRA_JUL=
mean(SOMBRA_JUL),SD_MAR= mean(SD_MAR),BLOQUE= "A1",Finca= "LP")
PRED2 <- predict(M3, ND, se = TRUE)
ND <- data.frame(CH_MAR = SEQ, HOJ_MAR= mean(HOJ_MAR),SOMBRA_JUL=
mean(SOMBRA_JUL),SD_MAR= mean(SD_MAR),BLOQUE= "J1",Finca= "LA")
PRED3 <- predict(M3, ND, se = TRUE)
ND <- data.frame(CH_MAR = SEQ, HOJ_MAR= mean(HOJ_MAR),SOMBRA_JUL=
mean(SOMBRA_JUL),SD_MAR= mean(SD_MAR),BLOQUE= "G1",Finca= "P")
PRED4 <- predict(M3, ND, se = TRUE)
ND <- data.frame(CH_MAR = SEQ, HOJ_MAR= mean(HOJ_MAR),SOMBRA_JUL=
mean(SOMBRA_JUL),SD_MAR= mean(SD_MAR),BLOQUE= "M2",Finca= "H")
PRED5 <- predict(M3, ND, se = TRUE)
ND <- data.frame(CH_MAR = SEQ, HOJ_MAR= mean(HOJ_MAR),SOMBRA_JUL=
mean(SOMBRA_JUL),SD_MAR= mean(SD_MAR),BLOQUE= "A2",Finca= "LP")
PRED6 <- predict(M3, ND, se = TRUE)
ND <- data.frame(CH_MAR = SEQ, HOJ_MAR= mean(HOJ_MAR),SOMBRA_JUL=
mean(SOMBRA_JUL),SD_MAR= mean(SD_MAR),BLOQUE= "J2",Finca= "LA")
PRED7 <- predict(M3, ND, se = TRUE)
ND <- data.frame(CH_MAR = SEQ, HOJ_MAR= mean(HOJ_MAR),SOMBRA_JUL=
mean(SOMBRA_JUL),SD_MAR= mean(SD_MAR),BLOQUE= "G1",Finca= "P")
PRED8 <- predict(M3, ND, se = TRUE)
ND <- data.frame(CH_MAR = SEQ, HOJ_MAR= mean(HOJ_MAR),SOMBRA_JUL=
mean(SOMBRA_JUL),SD_MAR= mean(SD_MAR),BLOQUE= "M3",Finca= "H")
PRED9 <- predict(M3, ND, se = TRUE)
ND <- data.frame(CH_MAR = SEQ, HOJ_MAR= mean(HOJ_MAR),SOMBRA_JUL=
mean(SOMBRA_JUL),SD_MAR= mean(SD_MAR),BLOQUE= "A3",Finca= "LP")
PRED10 <- predict(M3, ND, se = TRUE)
```

```

ND <- data.frame(CH_MAR = SEQ, HOJ_MAR= mean(HOJ_MAR),SOMBRA_JUL=
mean(SOMBRA_JUL),SD_MAR= mean(SD_MAR),BLOQUE= "J3",Finca= "LA")
PRED11 <- predict(M3, ND, se = TRUE)
ND <- data.frame(CH_MAR = SEQ, HOJ_MAR= mean(HOJ_MAR),SOMBRA_JUL=
mean(SOMBRA_JUL),SD_MAR= mean(SD_MAR),BLOQUE= "G3",Finca= "P")
PRED12 <- predict(M3, ND, se = TRUE)
PRED_PROMEDIO<-
(PRED1+PRED2+PRED3+PRED4+PRED5+PRED6+PRED7+PRED8+PRED9+PRED10+PRE
D11+PRED12)/12
lines(SEQ, PRED, lty = 2, col = "red")

```

```
#####Sombra#####
```

```

plot(EN_BAJA_MM_MAR~SOMBRA_JUL,type= "null", ylab= "Erosión neta (mm/año)",
xlab= "Sombra (Jul) (%)",cex.lab= 1,cex.axis= 1,las= 1,ylim= c(-20,30),xlim= c(55,100))
points(EN_BAJA_MM_MAR~SOMBRA_JUL,cex= 0.3)
points(EN_BAJA_MM_MAR[Tratamiento= "c"]~SOMBRA_JUL[Tratamiento= "c"],col=
"gray80",pch= 19,cex= 0.8)
points(EN_BAJA_MM_MAR[Tratamiento= "ch"]~SOMBRA_JUL[Tratamiento= "ch"],col=
"gray52",pch= 19,cex= 0.8) points(EN_BAJA_MM_MAR[Tratamiento= "h"]~SOMBRA_JUL[Tratamiento= "h"],col= "gray14",pch= 19,cex= 0.8)
SEQ <- seq(60,100, length = 30)
ND <- data.frame(SOMBRA_JUL = SEQ, HOJ_MAR= mean(HOJ_MAR),SD_MAR=
mean(SD_MAR),CH_MAR= mean(CH_MAR),BLOQUE= "M1",Finca= "H")
PRED1 <- predict(M3, ND, se = TRUE)
ND <- data.frame(SOMBRA_JUL = SEQ, HOJ_MAR= mean(HOJ_MAR),SD_MAR=
mean(SD_MAR),CH_MAR= mean(CH_MAR),BLOQUE= "A1",Finca= "LP")
PRED2 <- predict(M3, ND, se = TRUE)
ND <- data.frame(SOMBRA_JUL = SEQ, HOJ_MAR= mean(HOJ_MAR),SD_MAR=
mean(SD_MAR),CH_MAR= mean(CH_MAR),BLOQUE= "J1",Finca= "LA")
PRED3 <- predict(M3, ND, se = TRUE)
ND <- data.frame(SOMBRA_JUL = SEQ, HOJ_MAR= mean(HOJ_MAR),SD_MAR=
mean(SD_MAR),CH_MAR= mean(CH_MAR),BLOQUE= "G1",Finca= "P")
PRED4 <- predict(M3, ND, se = TRUE)
ND <- data.frame(SOMBRA_JUL = SEQ, HOJ_MAR= mean(HOJ_MAR),SD_MAR=
mean(SD_MAR),CH_MAR= mean(CH_MAR),BLOQUE= "M2",Finca= "H")
PRED5 <- predict(M3, ND, se = TRUE)
ND <- data.frame(SOMBRA_JUL = SEQ, HOJ_MAR= mean(HOJ_MAR),SD_MAR=
mean(SD_MAR),CH_MAR= mean(CH_MAR),BLOQUE= "A2",Finca= "LP")
PRED6 <- predict(M3, ND, se = TRUE)
ND <- data.frame(SOMBRA_JUL = SEQ, HOJ_MAR= mean(HOJ_MAR),SD_MAR=
mean(SD_MAR),CH_MAR= mean(CH_MAR),BLOQUE= "J2",Finca= "LA")
PRED7 <- predict(M3, ND, se = TRUE)
ND <- data.frame(SOMBRA_JUL = SEQ, HOJ_MAR= mean(HOJ_MAR),SD_MAR=
mean(SD_MAR),CH_MAR= mean(CH_MAR),BLOQUE= "G1",Finca= "P")
PRED8 <- predict(M3, ND, se = TRUE)
ND <- data.frame(SOMBRA_JUL = SEQ, HOJ_MAR= mean(HOJ_MAR),SD_MAR=
mean(SD_MAR),CH_MAR= mean(CH_MAR),BLOQUE= "M3",Finca= "H")

```

```

PRED9 <- predict(M3, ND, se = TRUE)
ND <- data.frame(SOMBRA_JUL = SEQ, HOJ_MAR= mean(HOJ_MAR),SD_MAR=
mean(SD_MAR),CH_MAR= mean(CH_MAR),BLOQUE= "A3",Finca= "LP")
PRED10 <- predict(M3, ND, se = TRUE)
ND <- data.frame(SOMBRA_JUL = SEQ, HOJ_MAR= mean(HOJ_MAR),SD_MAR=
mean(SD_MAR),CH_MAR= mean(CH_MAR),BLOQUE= "J3",Finca= "LA")
PRED11 <- predict(M3, ND, se = TRUE)
ND <- data.frame(SOMBRA_JUL = SEQ, HOJ_MAR= mean(HOJ_MAR),SD_MAR=
mean(SD_MAR),CH_MAR= mean(CH_MAR),BLOQUE= "G3",Finca= "P")
PRED12 <- predict(M3, ND, se = TRUE)
PRED<-
(PRED1+PRED2+PRED3+PRED4+PRED5+PRED6+PRED7+PRED8+PRED9+PRED10+PRE
D11+PRED12)/12
lines(SEQ, PRED, lty = 2, col = "red")

```