



CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL  
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA  
ESCUELA DE POSGRADO

**La degradación del suelo por erosión hídrica en cultivos de granos básicos y café en  
la microcuenca Torjá, cuenca del río Grande de Zacapa, Guatemala**

por

Gerardo Osvely Quiñónez Berganza

Tesis sometida a consideración de la Escuela de Posgrado  
como requisito para optar por el grado de

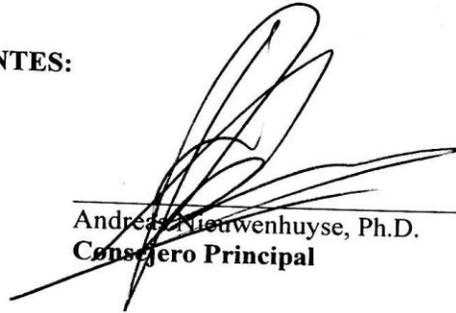
*Magister Scientiae* en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas

Turrialba, Costa Rica, 2012

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del Estudiante como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL  
DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

**FIRMANTES:**



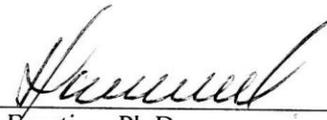
---

Andrés Nieuwenhuyse, Ph.D.  
**Consejero Principal**



---

Francisco Jiménez, Dr.Sc.  
**Miembro Comité Consejero**

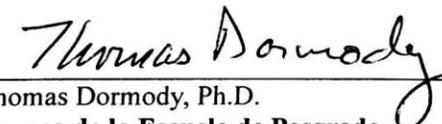


---

Jorge Faustino, Ph.D.  
**Miembro Comité Consejero**

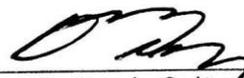
---

Karen Banegas, M.Sc.  
**Miembro Comité Consejero**



---

Thomas Dormody, Ph.D.  
**Decano de la Escuela de Posgrado**



---

Gerardo Osvely Quiñonez Berganza  
**Candidato**

## DEDICATORIA

A Dios

De Jehová es la tierra y su plenitud; el mundo, y los que en él habitan. Porque él la fundó sobre los mares, y la afirmó sobre los ríos.

Salmos 24:1,2

A mi esposa

Marleny, Gracias por ser la esposa que complementa mi vida y me hace feliz.

A mis hijos

Gerardo Daniel y José David, que son también mis grandes bendiciones

A mis padres

Osvely Quiñónez y Beatriz Berganza, mis papás amorosos y abnegados, gracias por estar conmigo.

A mis suegros

Por su apoyo como mis padres, mamá Odi, y papá Maco, que está hoy en la presencia de Dios

A mis hermanos

Erick y Gustavo Quiñónez

A mis cuñados

Fredy y Edvin Illescas

## AGRADECIMIENTOS

A CATIE, por la oportunidad que me concedió de ser parte esta gran institución. A MESOTERRA, por su apoyo para la realización de esta investigación.

Al doctor Andreas Nieuwenhuyse, por su asesoría, por su apoyo, por sus consejos, nuevamente, muchas gracias.

A los miembros de mi Comité Consejero, al doctor Francisco Jiménez, y al doctor Jorge Faustino, por sus consejos, asesoría y apoyo, también por las clases recibidas; a Karen Banegas, por su asesoría y apoyo en Copán; y a Rafael Blanco Sepúlveda, por su amistad y asesoría; a Cristóbal Villanueva por su amistad y gran apoyo en CATIE.

A mis amigos en Guatemala, Luis Hilton, la familia Jordán en San Juan Ermita, especialmente a Lourdes y Henry, y a Juan Pablo Guerra, que me dieron su amistad y apoyo.

A la iglesia Centroamericana de Turrialba, y a la iglesia Alpha y Omega en Chimaltenango.

A mis amigos del CATIE, por la gran experiencia compartida.

## CONTENIDO

DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTOS .....	IV
CONTENIDO .....	V
RESUMEN.....	X
SUMMARY .....	XII
ÍNDICE DE CUADROS.....	XIV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XV
LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS .....	XVI
1. INTRODUCCIÓN .....	1
<i>1.1 Objetivos del estudio</i> .....	2
<i>1.1.1 Objetivo general</i> .....	2
<i>1.1.2 Objetivos específicos</i> .....	2
2. MARCO REFERENCIAL .....	3
<i>2.1 Marco conceptual</i> .....	3
<i>2.1.1 Degradación de los suelos</i> .....	3
<i>2.1.2 Erosión</i> .....	4
<i>2.1.3 Erosión hídrica</i> .....	4
<i>2.1.4 Erosión laminar</i> .....	5
<i>2.1.5 Erosión en regueros o surcos</i> .....	5
<i>2.1.6 Erosión en cárcavas</i> .....	6
<i>2.1.7 Erosión por desprendimientos o deslizamientos</i> .....	6
<i>2.1.8 Reconocimiento visual de la erosión</i> .....	6
<i>2.1.9 Factores que intervienen en la erosión causada por el agua</i> .....	7
<i>2.1.10 Lluvia</i> .....	8
<i>2.1.11 Pendiente</i> .....	8
<i>2.1.12 Suelo</i> .....	8
<i>2.1.13 Infiltración</i> .....	8

2.1.14 Cobertura vegetal.....	9
2.1.15 Bases hidrológicas de la erosión .....	10
2.1.16 Flujo superficial o escorrentía.....	10
2.1.17 Efectos de la erosión hídrica.....	10
2.1.18 Carbono orgánico y degradación del suelo.....	11
2.1.19 Actividad humana y degradación del suelo .....	11
2.1.20 Factores socioeconómicos vinculados con la erosión .....	12
2.1.21 Sistemas de producción.....	14
2.1.22 Sistemas agropecuarios.....	15
2.1.23 Principales categorías de los sistemas de producción agropecuaria a nivel global.....	15
2.1.24 Sistemas agroforestales.....	15
3. METODOLOGÍA .....	16
3.1 Procedimiento metodológico general .....	16
3.2 Selección del área de investigación .....	16
3.3 Recopilación de información y formulación de la caracterización de la microcuenca.....	18
3.3.1 Características biofísica de la microcuenca.....	18
a) Área de la microcuenca .....	18
b) Orden de corrientes y densidad de drenaje de la microcuenca.....	18
c) Pendiente del cauce, elevación media y pendiente media de la cuenca .....	19
d) Caudal de la microcuenca .....	19
e) Clima.....	19
f) Geología de la microcuenca .....	21
g) Suelos .....	22
h) Zonas de Vida .....	24
i) División de la microcuenca .....	24
j) Capacidad de uso de la tierra.....	25

3.3.2 Características socioeconómicas de la microcuena .....	26
a) Demografía .....	26
b) Condiciones de vida en la microcuena .....	26
c) Educación.....	27
d) Clasificación de agricultores por el tamaño de la propiedad sobre la tierra según IICA....	27
3.4. Selección y caracterización de los sistemas de producción agrícola .....	27
3.5 Análisis de la degradación de los suelos en los sistemas de producción agrícola.....	27
3.5.1 Metodología para la observación de la erosión del suelo en el cultivo de café .....	28
3.5.2 Metodología para la observación de la erosión del suelo en los cultivos de maíz y frijol	32
3.5.3 Obtención de muestras de suelo de los sistemas agrícolas.....	36
3.5.4 Análisis estadístico.....	37
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
4.1 Caracterización del cultivo de café.....	37
4.1.1 Régimen de propiedad.....	38
4.1.2 Características agronómicas del café.....	38
4.1.3 Altura de las plantaciones.....	39
4.1.4 Historia de uso de las parcelas estudiadas .....	39
4.1.5 Especies y cobertura de sombra en las plantaciones de café .....	40
4.1.6 Fertilización .....	40
4.1.7 Deshierbes.....	41
4.1.8 Rendimientos .....	41
4.1.9 Estado de degradación del suelo en el cultivo de café .....	42
4.1.10 Influencia de factores biofísicos sobre la erosión.....	43
4.1.11 Suelo estabilizado temporalmente.....	44
4.1.12 Relación entre la cobertura de material orgánico en descomposición y el suelo estabilizado.....	44
4.1.13 Efecto de la cobertura herbácea viva .....	48

4.1.14 Relación de la sombra con el suelo estabilizado .....	49
4.1.15 Relación de la pendiente con el suelo estabilizado.....	50
4.1.16 Suelo afectado por erosión laminar.....	51
4.1.17 Relación de la sombra con la erosión laminar .....	53
4.1.18 Suelo desagregado por alteración mecánica.....	54
4.1.19 Relación de la sombra con el suelo desagregado.....	55
4.1.20 Relación de la pendiente con el suelo desagregado .....	56
4.2 Caracterización del cultivo de granos básicos .....	57
4.2.1 Régimen de propiedad.....	58
4.2.2 Rotación de cultivos .....	58
4.2.3 Formas de preparación de la tierra para la siembra .....	59
4.2.4 Control de malezas post-siembra.....	59
4.2.5 Fertilización .....	60
4.2.6 Ciclos de producción y descanso de la tierra .....	60
4.2.7 Tiempo transcurrido desde la eliminación del bosque .....	61
4.2.8 Aplicación de rozas .....	61
4.2.9 Rendimientos .....	61
4.2.10 Estado de degradación del suelo en cultivos de granos básicos .....	62
4.2.11 Análisis estadístico en el cultivo de maíz.....	65
4.2.12 Análisis de aleatoriedad de los datos de las parcelas de maíz de secano .....	65
4.2.13 Análisis de la influencia de los factores, pendiente, cobertura vegetal y suelo sobre la erosión.....	66
4.2.14 Análisis de contraste de los tipos de erosión y los factores ambientales.....	66
4.2.15 Análisis de contraste entre la erosión laminar y la pendiente de ladera.....	68
4.2.16 Análisis de la influencia de la cobertura vegetal del suelo (vegetación en descomposición) sobre la erosión en surcos y el volumen de suelo perdido.....	69
4.2.17 Volumen de suelo perdido por erosión laminar determinado con varillas (clavos) de hierro.....	70

5. CONCLUSIONES .....	72
6. RECOMENDACIONES .....	73
7. LITERATURA CITADA.....	74

## RESUMEN

La presente investigación evaluó la erosión del suelo en café y maíz, que son los sistemas agrícolas predominantes en la microcuenca Torjá de la cuenca del río Grande de Zacapa, en el departamento de Chiquimula, Guatemala. El periodo de observación de esta investigación fue entre mayo y agosto del 2011.

Se implementaron dos metodologías que usan indicadores visuales de los diferentes tipos de erosión, específicamente de la erosión laminar, la erosión en surcos y de las características del suelo desagregado por acción mecánica. Las metodologías aplicadas permitieron reconocer la magnitud de la erosión tanto en el sistema agrícola de maíz como en el cultivo agroforestal de café con sombra. No se hicieron comparaciones estadísticas entre los sistemas agrícolas estudiados, debido a que se utilizó una metodología diferente para cada uno de ellos. Además, se estudió el efecto de los factores biofísicos que podrían influir en la erosión, tales como, la pendiente, la cobertura vegetal y el efecto de la sombra para el caso del cultivo de café. Se determinó la correlación entre estos factores biofísicos y los diferentes tipos de erosión observados. Finalmente, en una parcela de maíz se estimó en forma cuantitativa la magnitud de la erosión laminar, usando el método de clavos (varillas de hierro) en un periodo de 28 días.

La superficie del suelo afectada por erosión en el cultivo de maíz fue estimada en 65% y la superficie que se determinó como estabilizada fue de 11%, que evidencia una erosión severa. En el cultivo de café con sombra, la superficie estimada afectada por erosión fue de 16%, y la superficie estabilizada 52%, que muestra claras diferencias en la severidad de la erosión entre estos dos sistemas agrícolas. La razón principal de las diferencias fue una presencia mucho mayor de una cobertura vegetal del suelo viva o en descomposición que protege el suelo contra la erosión en las parcelas de café. Sin embargo, es importante aclarar que las observaciones en el cultivo de maíz se realizaron unas pocas semanas después de la siembra, lo cual coincide con la época de máxima vulnerabilidad del suelo a la erosión hídrica por tener una cobertura mínima de vegetación viva o en descomposición.

La erosión laminar en las parcelas de maíz, estimada con las varillas de hierro, fue de  $25\text{m}^3$  por hectárea en un periodo de tan solo 28 días, que muestra la gravedad de la erosión en el sistema de cultivo de maíz en esta fase del cultivo. En ambos sistemas productivos, se encontró que la

cobertura vegetal tiene una correlación positiva altamente significativa con el suelo estabilizado, al igual que la cobertura de sombra en el cultivo de café. Además, en plantaciones de café, la pendiente fue un factor que se encontró con una correlación negativa con el suelo estabilizado, y con correlación positiva entre pendiente y superficie desagregada. La erosión en surcos también muestra diferencias evidentes, ya que en el cultivo de café únicamente el 0.1% de la superficie se observó afectada por este tipo de erosión, sin embargo en el cultivo de maíz la superficie afectada por erosión en surcos se estimó en 5%.

Se concluye que el cultivo de café en la microcuenca Torjá es un cultivo más sostenible que el cultivo de maíz y que la razón principal de encontrar más o menos erosión es la cobertura de la superficie del suelo con material vegetal vivo o en descomposición. Por lo tanto, se recomienda concientizar a los productores sobre este hecho y trabajar en conjunto con ellos en diferentes opciones de manejo de sus cultivos que promueven el aumento de la cobertura vegetal, tales como labranza mínima, diferentes opciones para mantener una cobertura mayor de rastrojos y la promoción de sistemas agroforestales que aumentan la cobertura del suelo.

## SUMMARY

This study evaluates soil erosion in maize field and coffee plantations, which are the predominant agricultural production systems in the Torjá watershed, located in the Chiquimula department in Guatemala. Field observations were carried out between May and August of 2011.

Two methodologies were used that use visual field indicators of the different forms of erosion (rill erosion, sheet erosion) as well as of soil disturbed by mechanical processes such as tillage and weeding. These methodologies allow estimating the magnitude of soil erosion processes in both production systems, but do not permit statistical analysis of results to compare both production systems due to the fact that methodologies were different. Furthermore, the effect of biophysical factors that may influence the occurrence and magnitude of erosion were studied, such as slope, soil cover and the effect of shade trees in the case of coffee. Correlation between these factors and the different erosive processes observed was determined. Soil loss caused by sheet erosion was quantified during a 28 day period using a method that installs iron rods in fixed positions and determines soil loss or accumulation.

65% of the soil surface of maize fields was affected by erosion while only 11% was classified as stable, indicating severe soil erosion. In coffee plantations, 16% of the soil surface was affected by erosion and 52% was considered stable. These data indicate clear differences between the two land uses. The main reason for the differences observed was that coffee plantations had a much higher soil cover with plant litter or herbs than maize field. However, it should be noted that observations in maize fields were realized few weeks after crop emergence, which is the period when soil cover is minimal due to the near absence of living plants and a reduced or minimal soil cover by plant litter. Sheet erosion in one maize field measured using the fixed iron rods, was estimated to be 25m<sup>3</sup> during the 28 days observation period, which illustrates again the magnitude of soil erosion in the observation period. In both production systems, soil vegetation cover was positively correlated with the soil surface classified as stable, as was shade cover in coffee plantations. In coffee plantations, correlation between slope and stable soil surface was negative, while correlation between slope and disturbed soil surface was positive. Rill erosion data show clear differences between production systems, as only 0.1% of the soil surface was affected in coffee plantations while in maize field it was estimated to be 5%.

It is concluded that in the Torjá watershed coffee cultivation is a more sustainable land use than maize cultivation and that the main reason for the differences observed in the magnitude of the erosive processes, are differences in soil cover by plant litter or by living plants. Therefore, it is recommended that farmer's awareness of these findings should be enhanced and that agricultural extension services should concentrate on the promotion of practices that increase soil cover, such as minimal tillage or different ways to cover the soil surface with crop residues, as well as the promotion of agroforestry options that increase soil cover.

## ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1. CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN DE SURCOS Y CÁRCAVAS.....	7
CUADRO 2. CAUDALES EN DIFERENTES PUNTOS DE LA MICROCUENCA .....	19
CUADRO 3. PROCESOS Y ELEMENTOS OBSERVADOS EN LA SUPERFICIE DEL SUELO EN LAS PARCELAS DE OBSERVACIÓN....	28
CUADRO 4. VARIABLES BIOFÍSICAS CONSIDERADAS EN LAS PARCELAS DE OBSERVACIÓN .....	29
CUADRO 5. PROCESOS Y ELEMENTOS OBSERVADOS EN LAS CUADRÍCULAS DE OBSERVACIÓN .....	33
CUADRO 6. EDADES DE LAS PLANTACIONES DE CAFÉ ESTUDIADAS DE LA MICROCUENCA TORJÁ .....	38
CUADRO 7. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS PLANTACIONES DE CAFÉ.....	38
CUADRO 8. DISTANCIAMIENTOS EN LAS PLANTACIONES ESTUDIADAS .....	39
CUADRO 9. ALTURAS DE LAS PLANTACIONES DE CAFÉ .....	39
CUADRO 10. TIEMPO TRANSCURRIDO EN AÑOS DESDE QUE SE ELIMINÓ EL BOSQUE .....	39
CUADRO 11. FRECUENCIA DE USO DE FERTILIZANTES Y CAL EN EL CULTIVO DE CAFÉ EN LA MICROCUENCA TORJÁ .....	41
CUADRO 12. SUPERFICIES AFECTADAS POR DIFERENTES PROCESOS EROSIVOS .....	42
CUADRO 13. VARIABLES BIOFÍSICAS OBSERVADAS EN LAS PLANTACIONES DE CAFÉ .....	43
CUADRO 14. CUADRO DE CORRELACIONES ENTRE PROCESOS SUPERFICIALES DEL SUELO Y FACTORES BIOFÍSICOS .....	44
CUADRO 15. COORDENADAS MÁXIMAS Y MÍNIMAS DONDE SE ESTABLECIERON PARCELAS DE OBSERVACIÓN .....	57
CUADRO 16. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS PARCELAS DE INVESTIGACIÓN DE GRANOS BÁSICOS.....	58
CUADRO 17. RÉGIMEN DE PROPIEDAD DE LAS PARCELAS DE GRANOS BÁSICOS EN LA MICROCUENCA TORJÁ.....	58
CUADRO 18. TIEMPO TRANSCURRIDO DESDE LA ELIMINACIÓN DEL BOSQUE EN PARCELAS DE GRANOS BÁSICOS.....	61
CUADRO 19. RENDIMIENTOS DE MAÍZ EN LAS PARCELAS DE GRANOS BÁSICOS.....	62
CUADRO 20. INCIDENCIA DE INDICADORES DE DEGRADACIÓN EN LAS PARCELAS DE OBSERVACIÓN (MAYO-JUNIO 2011 ...	63
CUADRO 21. INCIDENCIA DE INDICADORES RELACIONADOS CON AUSENCIA DE EROSIÓN .....	63
CUADRO 22. PROMEDIO DE LOS PROCESOS E INDICADORES SUPERFICIALES OBSERVADOS EN EL SUELO .....	64
CUADRO 23. ANÁLISIS DE CONTRASTE ENTRE LA COBERTURA VEGETAL CON TIPOS DE EROSIÓN Y VOLUMEN DE SUELO PERDIDO (TEST U DE MANN-WHITNEY) .....	67
CUADRO 24. ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN LAMINAR EN LA PARCELA DE OBSERVACIÓN CON VARILLAS DE HIERRO .....	70
CUADRO 25. ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN LAMINAR EN EL CUADRANTE 1 CON EL USO DE VARILLAS DE HIERRO .....	71
CUADRO 26. ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN LAMINAR EN EL CUADRANTE 2 CON EL USO DE VARILLAS DE HIERRO .....	71
CUADRO 27. ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN LAMINAR EN EL CUADRANTE 3 CON EL USO DE VARILLAS DE HIERRO .....	71
CUADRO 28. ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN LAMINAR EN EL CUADRANTE 4 CON EL USO DE VARILLAS DE HIERRO .....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN .....	16
FIGURA 2. UBICACIÓN DE LA MICROCUENCA TORJÁ.....	17
FIGURA 3. VARIABLES DEL CLIMA EN LA ESTACIÓN CAMOTÁN PROMEDIOS DE LOS AÑOS 1990 AL 2005. ....	20
FIGURA 4. PRECIPITACIÓN DE ENERO A AGOSTO DEL 2011. ....	21
FIGURA 5. MAPA DE GEOLOGÍA DE LA MICROCUENCA TORJÁ.....	22
FIGURA 6. MAPA DE SERIES DE SUELOS DE LA MICROCUENCA TORJÁ.....	23
FIGURA 7. ZONIFICACIÓN DE LA MICROCUENCA TORJÁ.....	25
FIGURA 8. CAPACIDAD DE USO DEL SUELO, SEGÚN LA METODOLOGÍA USDA, EN LA MICROCUENCA TORJÁ.....	26
FIGURA 9. SUB PARCELAS DE OBSERVACIÓN DE VARIABLES BIOFÍSICAS Y PROCESOS SUPERFICIALES EN EL SUELO EN CAFÉ .....	30
FIGURA 10. ESQUEMA DE UBICACIÓN DE CUADRÍCULAS DE OBSERVACIÓN EN SISTEMAS DE MAÍZ Y FRIJOL .....	33
FIGURA 11. ESQUEMA DE PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DE REGUEROS Y CÁRCAVAS.....	34
FIGURA 12. VARILLA DE MEDICIÓN DE EROSIÓN LAMINAR COLOCADA EN LA PARCELA DE OBSERVACIÓN .....	36
FIGURA 13. MATERIAL ORGÁNICO VEGETAL (HOJARASCA) SUELTO Y SUPERFICIAL .....	45
FIGURA 14. EVIDENCIA DE ESTABILIDAD POR EL MATERIAL ORGÁNICO VEGETAL EN PROCESO DE DESCOMPOSICIÓN .....	46
FIGURA 15. RELACIÓN DE LA COBERTURA DE MATERIAL ORGÁNICO CON LA SUPERFICIE ESTABILIZADA .....	46
FIGURA 16. ACUMULACIÓN DE MATERIAL ORGÁNICO POR LA ACCIÓN DE RAMAS Y PLANTAS DE CAFÉ .....	47
FIGURA 17. SUPERFICIE CON EVIDENCIA DE ESTABILIDAD .....	48
FIGURA 18. COBERTURA VEGETAL VIVA Y HOJARASCA EN UNA PARCELA DE OBSERVACIÓN DE CAFÉ.....	49
FIGURA 19. RELACIÓN DE LA SOMBRA CON LA SUPERFICIE ESTABILIZADA .....	50
FIGURA 20. RELACIÓN DE LA PENDIENTE CON LA SUPERFICIE ESTABILIZADA .....	51
FIGURA 21. SUPERFICIE AFECTADA POR EROSIÓN LAMINAR .....	52
FIGURA 22. EVIDENCIA DE EROSIÓN DE TIPO LAMINAR.....	52
FIGURA 23. EVIDENCIA DE EROSIÓN LAMINAR A TRAVÉS DE SUPERFICIES ALISADAS Y RAÍCES EXPUESTAS.....	53
FIGURA 24. RELACIÓN DE LA COBERTURA DE SOMBRA CON LA SUPERFICIE AFECTADA CON EROSIÓN LAMINAR .....	54
FIGURA 25. RELACIÓN DE LA COBERTURA DE MATERIAL ORGÁNICO CON LA SUPERFICIE DESAGREGADA .....	55
FIGURA 26. RELACIÓN DE LA SOMBRA CON LA SUPERFICIE DESAGREGADA .....	56
FIGURA 27. RELACIÓN DE LA PENDIENTE CON LA SUPERFICIE DESAGREGADA .....	56
FIGURA 28. SUELO AFECTADO POR EROSIÓN EN SURCOS CON DIFERENTES COBERTURAS DE VEGETACIÓN .....	68
FIGURA 29. RELACIÓN DE LA SUPERFICIE AFECTADA POR EROSIÓN EN SURCOS Y COBERTURA VEGETAL MUERTA .....	69
FIGURA 30. RELACIÓN DEL VOLUMEN DE SUELO PERDIDO Y COBERTURA VEGETAL MUERTA .....	70

## **LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS**

ATM: Atmósferas

CATIE: Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza

CEPAL: Comisión Económica para América Latina

CIAT: Centro Internacional de Agricultura Tropical

CIC: Capacidad de intercambio catiónico

CNULD: Convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación

DA: Densidad aparente

DAP: Diámetro a la altura del pecho

DR: Densidad real

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación

IIA: Instituto de Incidencia Ambiental

IICA: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura

INAB: Instituto Nacional de Bosques

MESOTERRA: Manejo Sostenible de Territorios Agropecuarios en Mesoamérica

MO: Materia orgánica

## 1. INTRODUCCIÓN

Se estima que cada año, se pierden millones de hectáreas de tierra para la agricultura a causa de la degradación del suelo (Dhruva Narayana 1986). El rápido aumento de la población está demandando, cantidades crecientes de alimento y combustible, como resultado, el suelo está siendo explotado más intensivamente, y se están habilitando tierras nuevas para la agricultura que muchas veces son más pobres y menos productivas que las tierras en explotación (Norman y Douglas 1996).

En Centro América la erosión hídrica es considerada la principal causa de degradación del suelo de las tierras agrícolas en laderas (Herweg 1996). Debido a la dificultad que representa la restauración de suelos degradados es más conveniente prevenir la erosión, y asegurar la sostenibilidad del suelo, que tratar de recuperarlo una vez se ha perdido. Por esta razón, la sostenibilidad del recurso suelo se ha hecho un asunto cada vez más importante (Norman y Douglas 1996).

Los gobiernos, organismos de desarrollo y organizaciones mundiales, han fomentado la conservación del suelo por su importancia para la productividad agropecuaria y los servicios ecosistémicos; estas iniciativas para la conservación incluyen estrategias de prevención para evitar que los usuarios de la tierra realicen actividades que degraden el suelo y acciones para comprometer a los usuarios a recuperar las tierras que se han degradado (CNULD 2009).

La región donde se ubica la microcuenca Torjá ha sido reportada de alto riesgo al deterioro de sus recursos naturales, desastres, incluso hambrunas, y presenta los índices de degradación de la tierra más severos de todo el territorio guatemalteco (Iarna 2006).

El conocimiento de la magnitud de la erosión es de vital importancia para la planificación y diseño de estrategias de conservación de suelos y agua; se han desarrollado varios métodos para la medición de la erosión, pero la mayoría presenta un grado de complejidad que no permite que sean utilizados por promotores de tecnologías de agricultura sostenible o por técnicos agrícolas en general (Herweg 1996).

La presente investigación evalúa la degradación del suelo por erosión hídrica, en café y granos básicos, cultivos dominantes en la microcuenca Torjá, Guatemala. La metodología empleada en esta investigación, posee características que son presentadas en este documento para que sea una referencia para posteriores investigaciones. Se espera que los resultados sirvan de línea base para el

monitoreo de los procesos de degradación o restauración del suelo en el área de estudio, y contribuyan a que futuras investigaciones o proyectos de desarrollo identifiquen estrategias y acciones eficientes para lograr sistemas de producción más sostenibles en la región.

## **1.1 Objetivos del estudio**

### **1.1.1 Objetivo general**

- 1) Describir las evidencias de degradación del suelo y sus causas en los sistemas de producción agrícolas predominantes en la microcuenca Torjá.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- 1) Caracterizar la microcuenca en sus componentes biofísicos y socioeconómicos relevantes para la producción agrícola.
  - ¿Qué características biofísicas posee la microcuenca?
  - ¿Qué características socioeconómicas posee la microcuenca?
- 2) Caracterizar los sistemas de producción agrícola predominantes en la microcuenca Torjá.
  - ¿Cuáles son las principales características biofísicas y agronómicas de los sistemas agrícolas priorizados para este estudio en la microcuenca?
- 3) Describir las condiciones actuales de la degradación del suelo y sus causas en los sistemas agrícolas predominantes.
  - ¿Cuál es el estado actual de la erosión hídrica y los factores que la influyen, en los sistemas de producción agrícola priorizados?
  - ¿Cuáles son las condiciones físicas y químicas del suelo en los sistemas de producción agrícola priorizados?
  - ¿Cuál es la percepción de los agricultores de la afectación de la erosión del suelo a la productividad?
  - De acuerdo a los indicadores de degradación del suelo, ¿qué tendencias de la magnitud de degradación se tienen en los sistemas de producción?
- 4) Proponer estrategias y acciones para un manejo más sostenible del suelo en la zona de estudio.
  - Con base en los diferentes aspectos analizados ¿qué estrategias y acciones pueden ayudar a hacer un manejo más sostenible del suelo en los sistemas agrícolas analizados en la cuenca?

## **2. MARCO REFERENCIAL**

### **2.1 Marco conceptual**

#### **2.1.1 Degradación de los suelos**

De acuerdo con la Carta Mundial de los Suelos, elaborada por la Conferencia Mundial de la FAO en 1982, la degradación de los suelos es la pérdida cualitativa y/o cuantitativa total o parcial de su productividad, como una consecuencia de procesos como la erosión, la salinización, la inundación, desertización y la contaminación. La degradación de los suelos repercute directamente sobre la agricultura y los recursos hídricos, pero también afecta gravemente a otros sectores de la economía y del medio ambiente (Mataix Solera 1999).

La erosión es un proceso de degradación que afecta la capacidad productiva del suelo, tradicionalmente la erosión se ha valorado en términos de toneladas de suelo perdido por hectárea por año, sin embargo también existen determinaciones más cualitativas de la erosión que permiten evaluar la pérdida de productividad del suelo y las consecuencias para el agricultor. Algunas vías para esta evaluación pueden ser por ejemplo la valoración de la pérdida de superficie cultivable, evaluación de la dinámica de nutrientes por medio de análisis de suelos, niveles de aplicación de insumos para la producción y evaluación de rendimientos, ó seguir la dinámica del grosor del horizonte A (Cubero Fernández 1994).

El suelo es el medio fisicoquímico en el que se desarrolla la vida para la mayoría de ecosistemas terrestres. El suelo es un componente ambiental que no puede ser aislado del entorno que lo circunda, es frágil, de difícil recuperación y de extensión limitada; su uso inadecuado, y el cambio de usos o su sobreexplotación por diversas actividades, pueden contribuir a la degradación de este recurso natural no renovable (Mataix Solera 1999).

El suelo es soporte y almacén de sustancias nutritivas para organismos terrestres y está constituido por un sistema trifásico sólido/líquido/gaseoso. El contenido y disposición de las partículas minerales y orgánicas del suelo, permiten una estructura donde tienen lugar procesos de naturaleza física, química y biológica. La combinación adecuada de los diferentes componentes del suelo y la ausencia de procesos interferentes hace posible que sea el medio para el desarrollo de organismos vivos (Mataix Solera 1999).

La degradación de los suelos es uno de los principales problemas con que se enfrenta el mundo en este momento. Considerando el aumento de población mundial, el suelo es y seguirá siendo en un futuro próximo la base de la producción, por lo que la demanda de suelo cultivable va a ser mucho mayor. Muchos millares de hectáreas dejan de cultivarse cada año por exceso de erosión, salinización, contaminación, anegación, esterilidad, y el potencial productivo básico declina progresivamente hacia la esterilidad (Mataix Solera 1999).

### **2.1.2 Erosión**

La erosión es la pérdida de materiales de las capas superficiales del suelo por la acción del agua o del viento. Si el agente erosivo es el agua se denomina erosión hídrica, y si es el viento se denomina erosión eólica (García y Dorronsoro 2000).

La erosión del suelo es un proceso con dos fases consistentes en el desprendimiento de partículas individuales de la masa del suelo y su transporte por los agentes erosivos, como las corrientes de agua o el viento. Cuando la energía de estos agentes no es suficiente para transportar las partículas, se produce la tercera fase, la deposición (Cubero Fernández 1994).

Al perder el horizonte A, el suelo disminuye su capacidad de retención de humedad, y probablemente también su capacidad de infiltración y si esto sucede habrá mayor escurrimiento y mayor riesgo de erosión (Cubero Fernández 1994).

La salpicadura es el agente más importante para el desprendimiento, la exposición continua a lluvias intensas debilita considerablemente el suelo como resultado del golpeteo de las gotas sobre la superficie de un suelo desnudo, las partículas del mismo pueden ser lanzadas por el aire hasta varios centímetros de distancia. El suelo también se disgrega por procesos bioquímicos y meteorización mecánica (alternancia de humectación y desecación, congelación y deshielo). Además, el suelo se altera por el laboreo y el pisoteo de hombres y ganado (Morgan 1997).

### **2.1.3 Erosión hídrica**

La erosión laminar y en surcos pequeños, son las formas de erosión que más afectan la agricultura por degradación y pérdida del horizonte A de los suelos, y la producción de sedimentos en los ríos. La erosión hídrica puede manifestarse como una erosión laminar, en regueros o surcos, en cárcavas o por desprendimientos o deslizamientos (Vahrson y Cervantes 1991).

#### **2.1.4 Erosión laminar**

La erosión laminar es la remoción del suelo de un área, sin que se desarrollen canales conspicuos. La erosión laminar es menos evidente que otros tipos de erosión, sobre todo durante los primeros estados, aunque en realidad es la más extendida. La evidencia varía entre los diversos tipos de suelos, la erosión laminar se reconoce por el adelgazamiento de la capa superficial del suelo, por la aparición de raspaduras, por la mezcla del horizonte B en la capa arable, y por la acumulación de materiales erosionados frescos en las partes más bajas de los campos. La erosión laminar puede llegar a ser seria en suelos no protegidos, aún con pendientes de tan solo 1 ó 2 por ciento, como sucede en algunos suelos Rendzina o Planosoles muy granulares, con capas arcillosas casi impermeables. Lo más frecuente sin embargo, es que afecte en mayor grado a los suelos con pendientes mayores. Por otro lado, los casos de suelos Lateríticos bien desarrollados, cultivados y en pendientes de 25 y hasta 50 por ciento, presentan poca erosión laminar (Castillo 1965).

Este fenómeno puede reconocerse al observar manchas claras en el suelo, en las cuales se nota la pérdida de la capa superior, que por poseer generalmente mayor contenido de materia orgánica, es de color más oscuro. También revelan erosión laminar la presencia de plantas con las raíces al descubierto, la existencia de montículos de suelo, plantas específicas de suelos degradados y piedras en la superficie de naturaleza litológica, análogas a las localizadas en el interior del terreno (Modelling).

#### **2.1.5 Erosión en regueros o surcos**

De acuerdo a Cubero Fernández (1996), los surcos se forman en dirección de la pendiente, indicando las zonas de mayor concentración de agua. Estas acumulaciones de agua de escorrentía arrastran y transportan las partículas de suelo formando pequeñas zanjas o surcos. La formación de surcos ocurre especialmente durante aguaceros de gran intensidad, y es propicia en zonas agrícolas con altas pendientes y suelos con elementos superficiales heterogéneos.

La erosión en surcos se caracteriza por los cauces pequeños y medianos que pueden llegar hasta el subsuelo, y su arrastre es mayor al ocasionado por la erosión laminar, pues la aceleración del agua en el surco es mayor al estar disponible en mayores volúmenes. En este tipo de erosión el efecto de la salpicadura no es tan fundamental como el de abrasión producto del flujo de agua (Gómez Delgado 2002).

### **2.1.6 Erosión en cárcavas**

Este tipo de erosión se produce cuando existe mayor concentración en el escurrimiento debido a las irregularidades del terreno que permiten la conjunción de varios surcos. La erosión en cárcavas afecta tan profundamente el suelo que el terreno no puede nivelarse con instrumentos de labranza ordinarios (Cubero Fernández 1994).

Como cárcavas pueden clasificarse aquellas rutas de aguas estrechas y poco profundas de 0,6 a 0,9 m, o de grandes dimensiones, de 9 a 14 m de profundidad y 22 a 35 m de ancho. Se observan en sección transversal en forma de U en zonas con suelos fácilmente erosionables, o V en suelos con más resistencia a la entalladura rápida, o presentan estratos cada vez más resistentes a medida que se profundiza la cárcava (Gómez Delgado 2002).

### **2.1.7 Erosión por desprendimientos o deslizamientos**

Estos movimientos masivos de suelo, generalmente se producen por el peso del suelo cuando está saturado con agua. En estos eventos las fuerzas que dan cohesión al suelo no son suficientes para sostener el peso del bloque y su resistencia se rompe sobre una superficie de falla o de resistencia mínima, y se desprende del resto del terreno. La erosión producto de este tipo de movimientos puede representar porcentajes significativos del total del tonelaje de material producido en una cuenca por concepto de erosión y es agudizado por el mal manejo de las laderas (Gómez Delgado 2002).

### **2.1.8 Reconocimiento visual de la erosión**

La evaluación de indicadores de degradación deben permitir acercarse a una noción de la capacidad productiva del suelo bajo las condiciones de manejo del agricultor, todavía no existen modelos sencillos que permitan valorar este concepto, no obstante el agricultor con conocimiento de indicadores de degradación de su suelo será más anuente a la implementación de mejores tecnologías (Cubero Fernández 1994).

#### **• Acumulaciones**

El suelo erosionado se deposita donde la velocidad y la capacidad de transporte del agua disminuye. El sedimento se queda encima de la superficie y forma una deposición de diferentes profundidades (Herweg 1998).

### • **Rugosidad**

La superficie del suelo se pone lisa por el impacto de las gotas de la lluvia y por el transporte de pequeñas partículas por escorrentía. Los agregados del suelo superficial son destruidos y el espacio entre los agregados se llena de partículas erosionadas. La rugosidad de la superficie es un indicador de la erosión por impacto de gotas de lluvia y erosión laminar. Después de la preparación de la tierra para la siembra o antes de la temporada de lluvias, la superficie contiene agregados cuyos diámetros pueden variar de unos pocos mm a algunos cm. Cuanta más arcilla y materia orgánica se encuentra en el suelo superficial, mayor es la estabilidad de los agregados; y cuanto más estables son, más tiempo es necesario para alisar la superficie. Cuanta más erosión por impacto y erosión laminar hay durante las lluvias, más se alisa la superficie. Los agregados se rompen y/o desaparecen, el espacio entre ellos se colmata con tierra fina, la infiltración de agua en el suelo se bloquea y la escorrentía aumenta (Herweg 1998).

### • **Surcos y cárcavas**

Para diferenciar la erosión en surcos y la erosión en cárcavas se han hecho diferentes escalas. En el cuadro 1 se presentan los criterios para diferenciar surcos y cárcavas por sus dimensiones de la siguiente manera:

Cuadro. 1 Criterios de clasificación de surcos y cárcavas

	<b>Anchura (cm)</b>	<b>Profundidad (cm)</b>
<b>Surcos poco profundos</b>	< 25	< 15
<b>Surcos poco profundos y anchos</b>	25 - 200	< 15
<b>Surcos profundos</b>	< 50	15 - 100
<b>Surcos profundos y anchos</b>	50-200	15 - 100
<b>Surcos anchos</b>	> 200	< 100
<b>Cárcavas</b>	cualquiera	> 100

Fuente: Manual del daño por erosión actual Herweg 1961

### **2.1.9 Factores que intervienen en la erosión causada por el agua**

De acuerdo a Morgan (1997), los factores que determinan la tasa de erosión son la lluvia, la escorrentía, el viento, las características del suelo, la pendiente, la cobertura vegetal y la presencia o ausencia de medidas de conservación.

### **2.1.10 Lluvia**

Las pérdidas de suelo están estrechamente relacionadas con la lluvia debido al impacto de las gotas contra el suelo, y por la contribución de la lluvia a la escorrentía. La lluvia contribuye particularmente a la erosión por flujo superficial y en regueros, para estos tipos de erosión la intensidad de las precipitaciones se consideran, generalmente, las características más importantes (Morgan 1997).

### **2.1.11 Pendiente**

De acuerdo a Morgan (1997) sobre una superficie plana las gotas de lluvia salpican las partículas del suelo aleatoriamente en todas direcciones, mientras que en un terreno en pendiente, más partículas de suelo son salpicadas pendiente abajo que pendiente arriba, aumentando así la proporción en función de la inclinación de la pendiente.

A medida que aumenta la pendiente y el largo de la pendiente, así aumenta la velocidad y el volumen del agua de escorrentía, y así su poder erosivo (Cubero Fernández 1994).

### **2.1.12 Suelo**

A nivel de textura los suelos con alto contenido de limo son más susceptibles a la erosión porque los poros del suelo son más impermeables por el limo, lo que reduce la capacidad de infiltración causando mayor escorrentía. Los suelos con alto contenido de arcilla tendrán baja capacidad de infiltración, y son muy susceptibles a la erosión en caso de aguaceros intensos. Los suelos arenosos tienen una gran capacidad de infiltración, absorbiendo la mayor parte del agua sin originar escorrentía superficial sin embargo la baja capacidad de unión de los agregados favorece el arrastre de sus partículas en lluvias intensas (Cubero Fernández 1994).

### **2.1.13 Infiltración**

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo. Los factores que influyen en la tasa de infiltración son: condición de la superficie del suelo y su cubierta vegetal, las propiedades del suelo, porosidad y conductividad hidráulica, y el contenido de humedad presente en el suelo (Chow *et al.* 1994). De acuerdo a Gómez Delgado (2002), el contenido de humedad es un factor significativo en el proceso de infiltración, pues la

capacidad de infiltración de un suelo tiende a disminuir si se da un aumento de humedad del mismo, como sucede cuando se produce una lluvia.

#### **2.1.14 Cobertura vegetal**

La vegetación actúa como una capa protectora o amortiguadora entre la atmósfera y el suelo. Las hojas y tallos, absorben parte de la energía de las gotas de lluvia, del agua en movimiento y del viento, de modo que el efecto de los agentes erosivos es menor que si actuaran directamente sobre el suelo, mientras que las raíces, contribuyen a la resistencia mecánica del suelo (Morgan 1997).

Pueden considerarse dos clases de cubierta vegetal: los bosques, y las praderas herbáceas. En los bosques se forma un mantillo que protege el suelo de la acción directa de las gotas de lluvia, el agua gotea desde las hojas y ramas sobre el mantillo o escurre por los troncos. El mantillo impide la desagregación del suelo y que las partículas que quedan en suspensión obstruyan los poros que limiten la filtración del agua al suelo, por lo que esa espesa cubierta de hierba impide la obstrucción de los poros del suelo y permite una percolación normal e ininterrumpida del agua (Gustafson 1957).

La cubierta vegetal actúa contra la erosión a través de los siguientes mecanismos. Primero, la vegetación resta caudales de precipitación susceptible de golpear la superficie o de producir escorrentía mediante la interceptación. Segundo, la vegetación evita el impacto directo de las gotas de lluvia sobre la superficie, por lo que evita la dispersión del material y el encostramiento de la superficie. Tercero, la vegetación favorece la infiltración del agua al estructurar el suelo. Cuarto, la retención de la humedad favorece la infiltración. Y finalmente la vegetación aglutina el suelo con sus raíces (González Hidalgo 1998).

La eficacia de una cubierta vegetal para reducir la erosión por impacto de las gotas de lluvia depende, principalmente de la altura y continuidad de la vegetación, y de la densidad de cobertura del suelo. La altura de la vegetación es importante porque las gotas de agua que caen desde 7 m pueden alcanzar más del 90% de su velocidad terminal. Más aún, las gotas de lluvia interceptadas por la cubierta pueden unirse a otras en las hojas aumentando de tamaño y haciéndose más erosivas (Morgan 1997).

En un estudio de campo con maíz, con el 88% de cobertura y una altura media de 2 m, Morgan (1997) comprobó que el desprendimiento, fue 14 veces mayor que en campo abierto, para una intensidad de lluvia de 100 mm/h, y 2.4 veces mayor para una intensidad de 50 mm/h.

De acuerdo a Elwell y Stocking (1976) citados por Morgan (1997) para una protección adecuada, al menos el 70% de la superficie debe estar cubierta, aunque también menciona que se puede obtener una protección aceptable con el 40% de suelo cubierto. Sin embargo, los efectos de la vegetación no son totalmente simples y, bajo determinadas condiciones, la erosión puede verse potenciada por la cobertura vegetal.

### **2.1.15 Bases hidrológicas de la erosión**

Los procesos de erosión hídrica están relacionados con las rutas que sigue el agua a través de la superficie del suelo. Durante una tormenta, a la parte del agua que cae directamente sobre el suelo se le conoce como precipitación directa. Parte de la lluvia es interceptada por la cobertura vegetal, y vuelve a la atmósfera por evaporación, o llega al suelo goteada por las hojas (drenaje foliar), o fluye hacia abajo por los tallos. La precipitación directa y el drenaje foliar provocan erosión por salpicadura. Parte de la lluvia que llega al suelo se almacena en pequeñas depresiones u hondonadas de la superficie o puede infiltrarse en el suelo contribuyendo a su contenido de humedad, o por percolación a recargar los acuíferos. Cuando el suelo es incapaz de almacenar más agua, el exceso se desplaza por su interior y a favor de la pendiente, como flujo sub superficial o flujo interno, o escurre por la superficie provocando erosión como flujo laminar o en regueros y cárcavas (Morgan 1997).

### **2.1.16 Flujo superficial o escorrentía**

El flujo superficial o escorrentía se produce en las laderas durante una o varias lluvias que superan la capacidad de almacenaje del suelo. Es raro que el flujo presente una forma de lámina de agua de profundidad uniforme, lo más frecuente es una masa trenzada de cursos de agua que no tienen canales marcados (Morgan 1997).

### **2.1.17 Efectos de la erosión hídrica**

Las consecuencias de la erosión del suelo se manifiestan tanto en el lugar donde se produce (*in situ*) como fuera de él (erosión difusa). Los efectos *in situ* son importantes en las tierras de uso agrícola, por la redistribución y pérdida del suelo, la degradación de su estructura y el arrastre de

materia orgánica y de nutrientes, que causan la pérdida del espesor del perfil cultural y al descenso de la fertilidad. La erosión difusa, que se produce a consecuencia de la sedimentación aguas abajo, reduce la capacidad de transporte de ríos y acequias, aumenta el riesgo de inundaciones, ciega los canales de riego y disminuye la vida útil de los embalses y represas hidroeléctricas (Morgan 1997).

Al aumentar la precipitación también aumenta la cobertura vegetal y se obtiene mejor protección de la superficie. Con precipitaciones totales superiores a 300 mm, el efecto de protección de la vegetación, contrarresta los efectos erosivos de las lluvias crecientes y las pérdidas de suelo disminuyen. Sin embargo las pérdidas de suelo pueden aumentar de nuevo al hacerlo las precipitaciones debido al incremento de la escorrentía (Morgan 1997).

Parte de los sedimentos procedentes de las colinas, terraplenes y excavaciones, encuentran su salida en los ríos, pero otra parte se deposita al pie de las pendientes y en llanuras anegables, donde permanecen temporalmente almacenados; a veces hasta la siguiente tormenta, en otras ocasiones durante muchos años. En las cuencas hidrográficas más grandes tiende a haber mayor proporción de estos sumideros de sedimentos, las tasas de erosión expresadas por unidad de superficie son generalmente más altas para las cuencas pequeñas y disminuyen al aumentar el tamaño de la cuenca. La proporción de los sedimentos erosionados de la superficie del terreno que descarga dentro del río se conoce como tasa de liberación de sedimentos (Morgan 1997).

#### **2.1.18 Carbono orgánico y degradación del suelo**

Existen prácticas agrícolas y ganaderas que son conocidas porque favorecen la acumulación adicional de carbono en el suelo, y como consecuencia el mejoramiento de su fertilidad y efecto positivo sobre el ambiente (Robert 2002).

Uno de los efectos directos de la erosión es la pérdida de la materia orgánica, y con ella la reserva de carbono del suelo que es el principal reservorio de carbono de la tierra, incluso en mayor proporción que la cobertura vegetal. Este es actualmente un tema relevante a nivel mundial, por la importancia de la fijación y almacenamiento de carbono como vía para reducir el calentamiento global y el cambio climático (Vargas Cabezas 2010).

#### **2.1.19 Actividad humana y degradación del suelo**

Muchas prácticas agrícolas propician la degradación de la resistencia del suelo y el aumento de escorrentía superficial. Las prácticas inadecuadas de cultivo como la agricultura en terrenos

inclinados, la deforestación, el sobrepastoreo y el mal diseño en la construcción de carreteras, caminos, y otras obras civiles, son elementos que favorecen el fenómeno erosivo (Gómez Delgado 2002).

Sin embargo también se aplican en la agricultura, técnicas de manejo de los suelos en ladera que mejoran la capacidad de infiltración de los suelo y encausan el agua de escorrentía de tal manera que no generen lavado y ofrecen protección contra la erosión (Marchamalo 2007).

El manejo de suelos en ladera es una combinación de prácticas para solucionar el problema de degradación del suelo. Los proyectos tradicionales de manejo de suelos consistían en obras físicas proteccionistas como las terrazas, muros, zanjas de ladera, sin prestarle atención al mejoramiento de la productividad. Esto no permitió que se obtuvieran beneficios a corto o mediano plazo (Lupe y Usaid 1998).

Las estrategias tradicionales del manejo de suelos ha mejorado con la ayuda de investigaciones y las experiencias obtenidas, y han surgido las prácticas agroforestales, técnicas orgánicas como el frijol abono, incorporación de materia orgánica, uso de coberturas (mulch o plantas vivas), barreras vivas, y las obras físicas quedaron en un plano secundario, con uso únicamente cuando el beneficio supera el alto costo de su construcción y mantenimiento (Lupe y Usaid 1998).

La cobertura del suelo es el factor más eficiente para el control de la erosión al proteger la superficie del suelo contra el impacto de las gotas de lluvia, reduce la velocidad de la escorrentía y atrapa las partículas de suelo. Estudios realizados en varios países, demuestran que incluso pequeñas cantidades de mulch o cobertura viva ayudan a controlar la erosión, además mejora la infiltración, y conserva la humedad (Lupe y Usaid 1998).

### **2.1.20 Factores socioeconómicos vinculados con la erosión**

La erosión del suelo en muchos casos sólo se ha analizado bajo el contexto de la erosividad de la lluvia y la erodabilidad de los suelos, sin tomar en cuenta el entorno social y económico que también son influyentes en el proceso de la erosión. Algunos de estos factores son la densidad de población, el tamaño y distribución de las fincas, tenencia de la tierra, mercadeo, aspectos culturales, conocimiento de la erosión y sus efectos (Cubero Fernández 1994).

- **Densidad de la población**

La presión sobre el uso de la tierra aumenta cuando el número de habitantes es mayor, lo que ocasiona el avance de la frontera agrícola y la habilitación de tierras no aptas para la agricultura, como tierras con pendientes excesivas o con suelos poco profundos, tierras que se degradan por sobre uso, por ausencia o inadecuadas prácticas de conservación de suelos (Cubero Fernández 1994).

El aumento de la población propicia la subdivisión de las propiedades, dando lugar a las mini fincas que aceleran el proceso erosivo por la disminución de la cobertura vegetal, y la pérdida de control de la escorrentía, cuyas consecuencias hidrológicas son la disminución de la recarga de los acuíferos, ampliación de las fluctuaciones del caudal de los ríos y contaminación del agua (Cubero Fernández 1994).

- **Tamaño y distribución de las fincas**

Existen evidencias que en las grandes explotaciones agrícolas en Centroamérica, los problemas de erosión son menos graves que en las pequeñas explotaciones, debido a que en estas últimas predominan los cultivos limpios que exigen labores periódicas, y el suelo es explotado intensivamente para obtener ingresos a corto plazo. En estos sistemas, cuando existe algún mecanismo de control de escorrentía, no se integra el conglomerado de parcelas o fincas, lo que propicia la degradación en cadena de las fincas de una misma vertiente hidrológica (Cubero Fernández 1994).

- **Tenencia de la tierra**

Los agricultores que arrendan tierras para cultivar, lo hacen por corto tiempo y no se interesan en realizar prácticas adecuadas de manejo y conservación de suelos. Al propietario le interesa una retribución económica inmediata, y al arrendatario, aprovechar al máximo las tierras que arrenda en el tiempo más corto, a menudo con cultivos anuales aprovechando la fertilidad remanente de los suelos (Cubero Fernández 1994).

- **Régimen de propiedad de la tierra**

Información sobre la propiedad de la tierra permite estimar mejor la factibilidad de la implementación de prácticas de manejo del suelo adecuadas. Cuestiones políticas como la legalización de la tierra, derechos de los usuarios y seguridad de tenencia, burocracia, regulaciones y

leyes o impuestos, pueden favorecer o complicar la implementación de prácticas de conservación de suelos, si son los agricultores los dueños de la tierra o tienen la tenencia segura a largo plazo se puede esperar que inviertan más en su tierra, las normas y leyes del gobierno motivan o desaniman a la gente a implementar tecnologías de conservación de suelos (Herweg 1998).

- **Mercadeo**

Los precios de los productos agrícolas, no le permite al agricultor invertir mucho en el cuidado de su tierra, además el buscará cultivos para los cuales la venta es segura lo cual explica su arraigo al monocultivo y ausencia de rotación de cultivos (Cubero Fernández 1994).

- **Aspectos culturales**

Los agricultores utilizan tecnologías heredadas de sus antecesores, que aunque les haya permitido cultivar las tierras hasta la actualidad, también las han degradado, además el nivel educativo puede determinar el éxito y adopción de programas de control de la erosión (Cubero Fernández 1994).

- **Conocimiento de la erosión y sus efectos**

Muchas veces los agricultores desconocen el efecto de la erosión en la disminución de sus cosechas y las prácticas para controlarla. Esta situación cobra mayor relevancia al considerar que muchas áreas dedicadas a la explotación agrícola, tienen limitaciones físicas y climáticas que determinan una capacidad de uso menos intensiva que el uso que actualmente se les está dando (Cubero Fernández 1994).

### **2.1.21 Sistemas de producción**

De acuerdo con Berdegué y Larraín (1998), un sistema de producción es un conjunto de actividades que la sociedad organiza, dirige y realiza de acuerdo a sus objetivos, cultura y recursos, utilizando prácticas en respuesta al medio ambiente físico. Un sistema de producción tiene subsistemas organizados, es decir, hay un orden en el arreglo de los subsistemas, que se encuentran presentes en proporciones determinadas y cumpliendo ciertas funciones específicas.

El análisis de sistemas de producción se basa en un proceso metodológico que permite ordenar la realidad perceptible y definir sus componentes, interacciones y límites de la unidad de producción. Esto permite realizar intervenciones de tipo tecnológico sobre componentes específicos,

sin perder la visión integral del sistema productivo, su inserción en sistemas de jerarquía mayor, y el impacto de los cambios sobre la totalidad del sistema (Maas 1996).

### **2.1.22 Sistemas agropecuarios**

Un sistema de producción agropecuaria se define como el conglomerado de sistemas de fincas individuales, que en su conjunto presentan una base de recursos, patrones empresariales, sistemas de subsistencia y limitaciones familiares similares, y para los cuales serían apropiadas estrategias de desarrollo e intervenciones también similares. Dependiendo del alcance del análisis, un sistema de producción agropecuaria puede englobar, ya sea unas cuantas docenas, o millones de hogares agropecuarios (FAO 2001).

### **2.1.23 Principales categorías de los sistemas de producción agropecuaria a nivel global**

La caracterización de los principales sistemas de producción agropecuaria permite proponer estrategias e intervenciones de desarrollo agrícola apropiadas a un nivel más generalizado que al interior de un sistema agropecuario familiar. La decisión de adoptar estos amplios sistemas de producción crea heterogeneidad al interior de un sistema en particular, pero la alternativa de identificar los distintos sistemas de producción agropecuaria al nivel micro en cada país en desarrollo, dificulta la propuesta de estrategias apropiadas, tanto al nivel regional como global y esto disminuye el impacto global del análisis. Los criterios para la clasificación de los sistemas de producción agropecuaria de las regiones en desarrollo, de acuerdo a la FAO (2001), son los siguientes:

- a) Los recursos naturales disponibles, incluyendo agua, tierra, áreas de pastoreo, bosque, clima, entorno geográfico, área predial, tenencia de la tierra y organización.
- b) Actividades agrícolas predominantes y formas de subsistencia de los hogares agropecuarios, incluyendo cultivos, ganadería, forestería, acuacultura, caza y recolección, procesamiento y actividades extra-pediales; se toman en cuenta las principales tecnologías usadas, que determinan la intensidad de la producción e integración de los cultivos, ganadería y otras actividades.

### **2.1.24 Sistemas agroforestales**

Un sistema agroforestal es una forma de uso y manejo de recursos naturales, en el cual especies leñosas son utilizadas en asociación con cultivos agrícolas, ó con animales en el mismo

terreno, de manera simultánea o en una secuencia temporal. En el área Chortí uno de los sistemas agroforestales es el de árboles de sombra en el cultivo de café (Aguayo 2007).

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Procedimiento metodológico general

En la figura 1, se sintetizan las fases y la secuencia desarrollada para la investigación a partir de la selección de la microcuenca, hasta la fase de la propuesta de estrategias y acciones para un manejo más sostenible del recurso suelo, como se presenta a continuación.

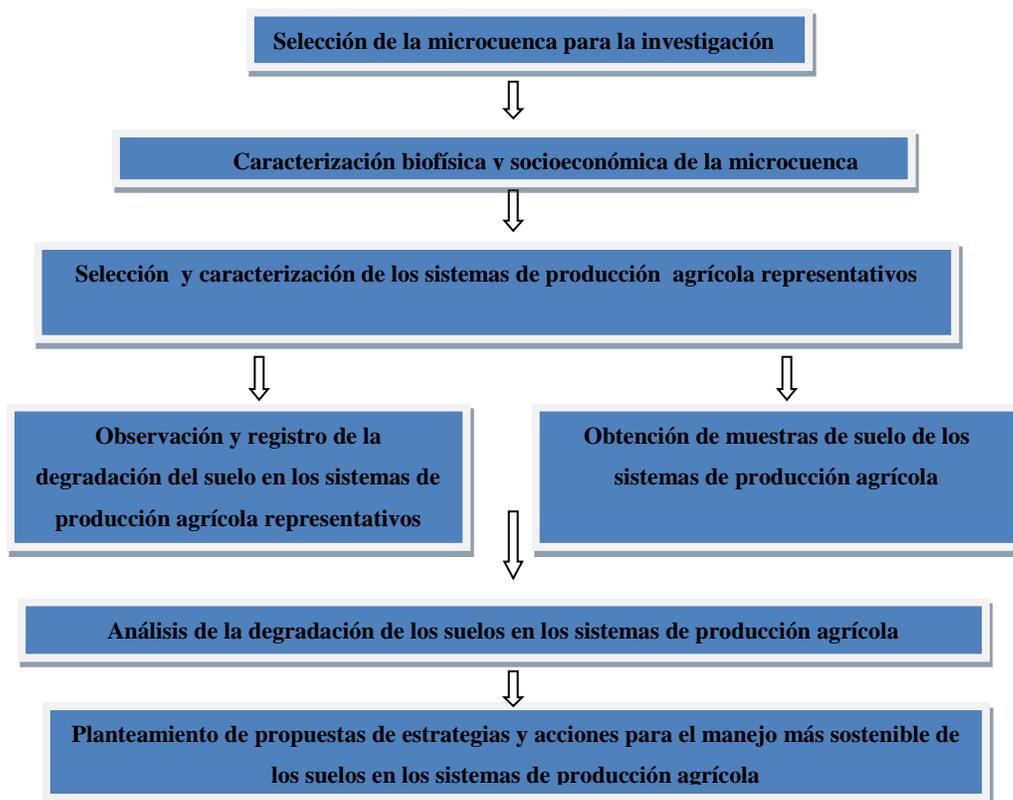


Figura 1. Procedimiento metodológico de la investigación

#### 3.2 Selección del área de investigación

La investigación se realizó en el marco del proyecto Manejo Sostenible de Territorios Agropecuarios en Mesoamérica (MESOTERRA) del CATIE que trabaja en el Trifinio, que es una zona montañosa fronteriza entre Guatemala, Honduras y El Salvador. Al tomar en cuenta la importancia de la interrelación entre los aspectos biofísicos y socioeconómicos, se decidió realizar la

investigación en una microcuenca representativa de la región, y se seleccionó la microcuenca Torjá, de la subcuenca del río Grande de Zacapa de la cuenca del río Motagua, que drena hacia la vertiente del Atlántico. La microcuenca seleccionada se encuentra entre los municipios de Jocotán, Olopa, Camotán y San Juan Ermita del departamento de Chiquimula, Guatemala (figura 2).

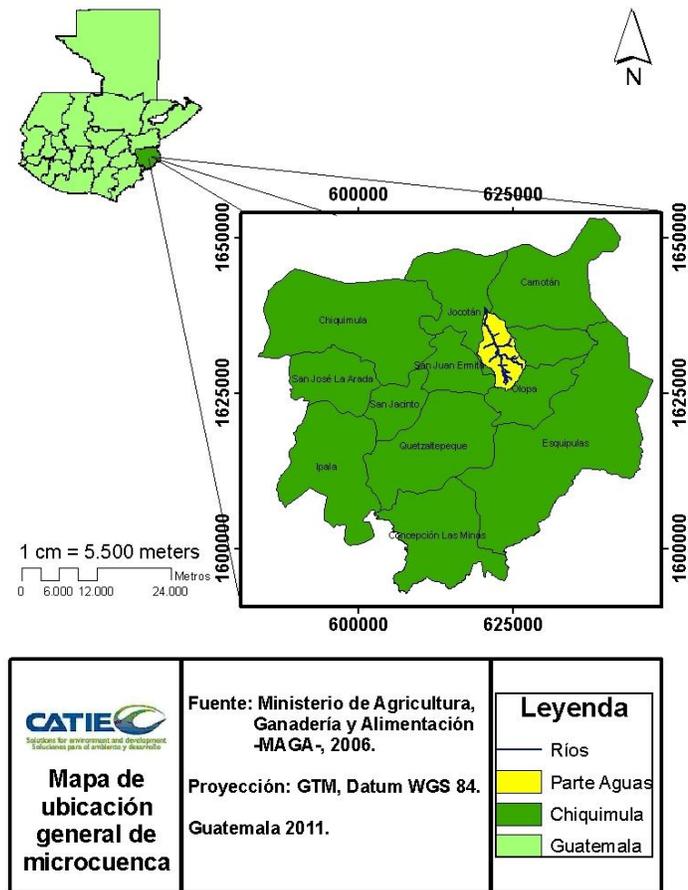


Figura 2. Ubicación de la microcuenca Torjá

Fuente: Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación

Los criterios para la selección de la microcuenca fueron los siguientes:

- 1) Los sistemas agrícolas presentes son representativos de la región de los municipios de Camotán, Jocotán, Olopa y San Juan Ermita que son municipios con alta vulnerabilidad en seguridad alimentaria y degradación de los recursos naturales (IARNA 2006). Estos municipios se encuentran organizados dentro de la Mancomunidad Copán Chortí en la zona del Trifinio.

- 2) Los suelos de la microcuenca presentan importantes procesos de degradación por erosión como consecuencia de la actividad agrícola.
- 3) La microcuenca presenta características demográficas de alta densidad poblacional, así como presencia de organizaciones con injerencia en el manejo de recursos naturales tales como MESOTERRA.
- 4) Anuencia de la población local para apoyar el proceso de la investigación.
- 5) Disponibilidad de información básica de carácter biofísico y socioeconómico de la microcuenca.

### **3.3 Recopilación de información y formulación de la caracterización de la microcuenca**

Se efectuaron recorridos dentro de la microcuenca para reconocer preliminarmente sus condiciones biofísicas, socioeconómicas, y sus sistemas agrícolas, así como para establecer contactos con las autoridades locales para presentar los objetivos de la investigación y tener la anuencia y participación de la población. Además se recopiló información pertinente, de carácter demográfico, económico, social y biofísico de la microcuenca en diferentes organizaciones gubernamentales y no gubernamentales. Los resultados más relevantes se presentan en el inciso 3.4

#### **3.3.1 Características biofísica de la microcuenca**

De acuerdo a información obtenida a través de SIG, y evaluación en campo, se determinaron las siguientes características geomorfológicas e hidrológicas de la microcuenca:

##### **a) Área de la microcuenca**

La microcuenca del río Torjá tiene un área de 5788 hectáreas, compartida entre los municipios de Camotán (447 ha), Olopa (1777 ha), San Juan Ermita (31 ha) y Jocotán (3533 ha). La microcuenca tiene un perímetro de 36,65 kilómetros.

##### **b) Orden de corrientes y densidad de drenaje de la microcuenca**

De acuerdo al índice de Horton, que se refiere a la medida de ramificaciones de un cauce, que incluye corrientes perennes como intermitentes, la microcuenca es de orden 10, que indica una alta ramificación de la red de drenaje con una respuesta rápida a la evacuación de la precipitación. La longitud de ramificaciones perennes es de 22 km, que determina una densidad de drenaje de 0,38 km/km<sup>2</sup>.

### c) Pendiente del cauce, elevación media y pendiente media de la cuenca

La pendiente del cauce está determinada por la diferencia de elevación del punto más alto del cauce principal (1310 msnm) y el punto de salida del drenaje de la cuenca (430 msnm). La longitud del cauce se calculó en 15600 metros, de manera que la pendiente promedio del cauce es 5,6%.

La elevación media de la cuenca se refiere a la cota que divide por la mitad el área de la microcuenca, para este caso la cota es 740 msnm. La zona alta se encuentra en el rango de nivel de 740 a 1620 msnm, y la zona baja tiene un rango de nivel de 740 msnm a 430 msnm en el punto de aforo de la microcuenca. Existe una diferencia de nivel de 880 metros en la zona alta y únicamente 310 metros de diferencia altitudinal en la parte baja. Por lo tanto, por las mayores pendientes, puede asumirse una mayor susceptibilidad del suelo a la erosión en la parte alta de la microcuenca.

La pendiente media, que toma en cuenta la elevación máxima y mínima de la cuenca y la distancia que existe entre estos puntos, es de 8,87%.

### d) Caudal de la microcuenca

Con la finalidad de evaluar la cantidad de agua del cauce principal se aforaron tres partes de la microcuenca en la segunda quincena de febrero del 2011. También puede observarse en el cuadro 2 que el caudal es menor en el punto de salida que en la parte media, debido a la presencia de áreas con riego en la parte baja de la microcuenca.

Cuadro 2. Caudales en diferentes puntos de la microcuenca

Caudales de la microcuenca del río Torjá				
Parte	Aldea	Caudal (m <sup>3</sup> /hora)	Coordenadas UTM	
Alta	Tuticopote Abajo	176	247240	1629087
Media	Tunucó Abajo	977	245324	1633530
Baja (salida del drenaje)	Jocotán	801	244314	1639444

Fuente: Mancomunidad Copán Chortí 2011.

### e) Clima

Para evaluar el clima de la cuenca se recopiló información de precipitación (mm) temperatura media del aire (°C) y humedad relativa media del aire (%) (figura 3). La información se obtuvo de la estación meteorológica, en el municipio de Camotán a una distancia aproximada de 1

km del punto de aforo, ubicada fuera de la microcuenca, la cual se encuentra a una altitud de 950 msnm.

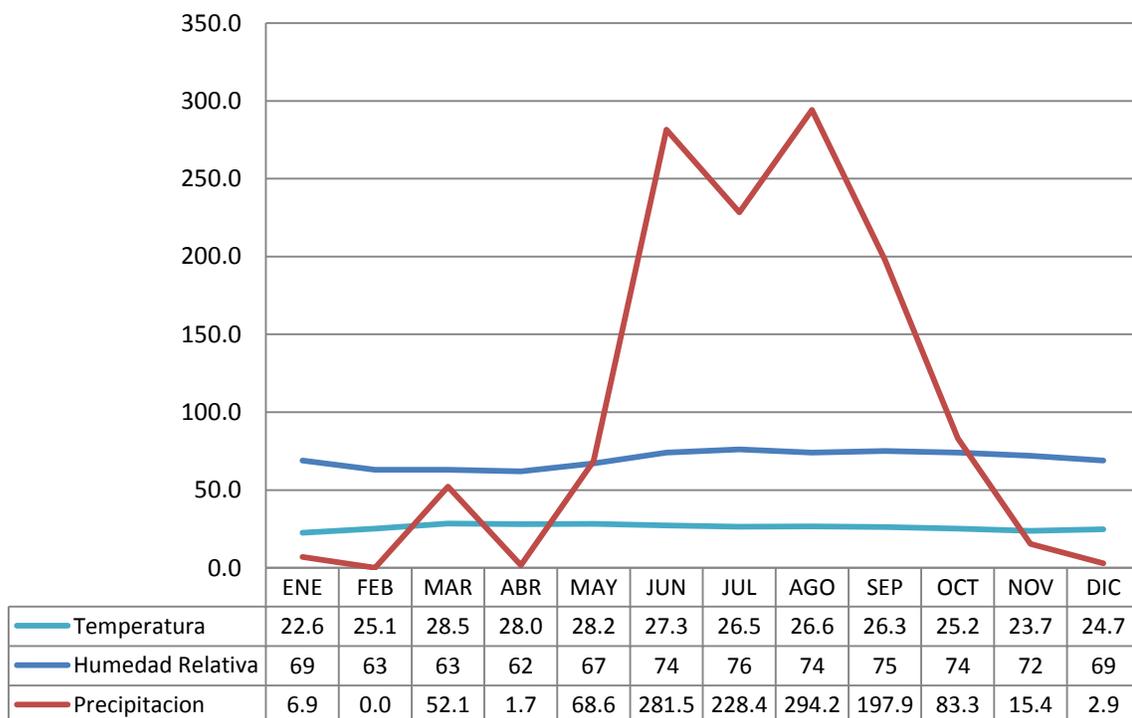


Figura 3. Variables del clima en la estación Camotán promedios de los años 1990 al 2005.

Fuente: Mancomunidad Copán Chortí

También se obtuvo el registro de precipitación de enero a agosto del 2011 (figura 4). Además del registro de la estación Camotán se obtuvo el registro de la estación Esquipulas ubicada en las coordenadas Latitud Norte 14° 33'32'' y Longitud Oeste 89° 20' 31'' a una elevación de 1000 msnm. Tanto la estación Camotán como la estación Esquipulas son las estaciones meteorológicas más cercanas a la microcuenca, ver la figura 4.

## Precipitación enero - agosto del 2011

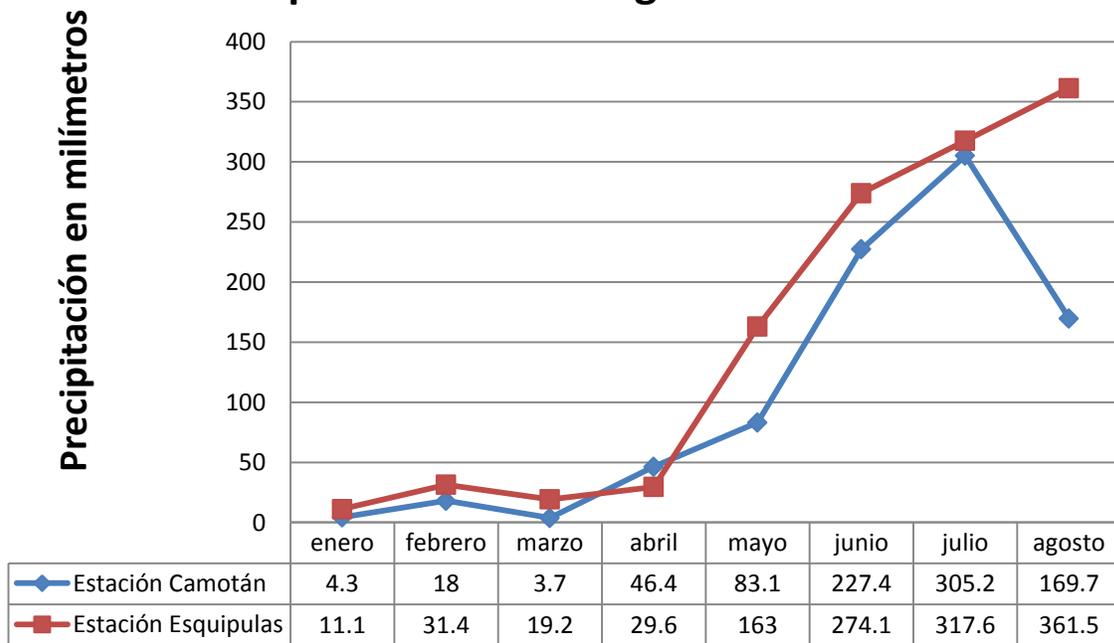


Figura 4. Precipitación de enero a agosto del 2011.

Fuente: Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología INSIVUMEH

### f) Geología de la microcuenca

La mayor parte de la microcuenca está formada a partir de rocas sedimentarias que tienen su origen en el período Cretácico (Ksd). También se caracteriza por poseer rocas ígneas y metamórficas, formadas en el período Terciario, caracterizadas por rocas volcánicas sin dividir (Tv y Pzm) como puede observarse en el mapa de geología de la microcuenca. En la parte baja de la microcuenca dominan las rocas sedimentarias desarrolladas en el período Cretácico-Eoceno (Qa), y rocas sedimentarias (KT sb) y terrazas aluviales predominantemente terciarias (Figura 5).

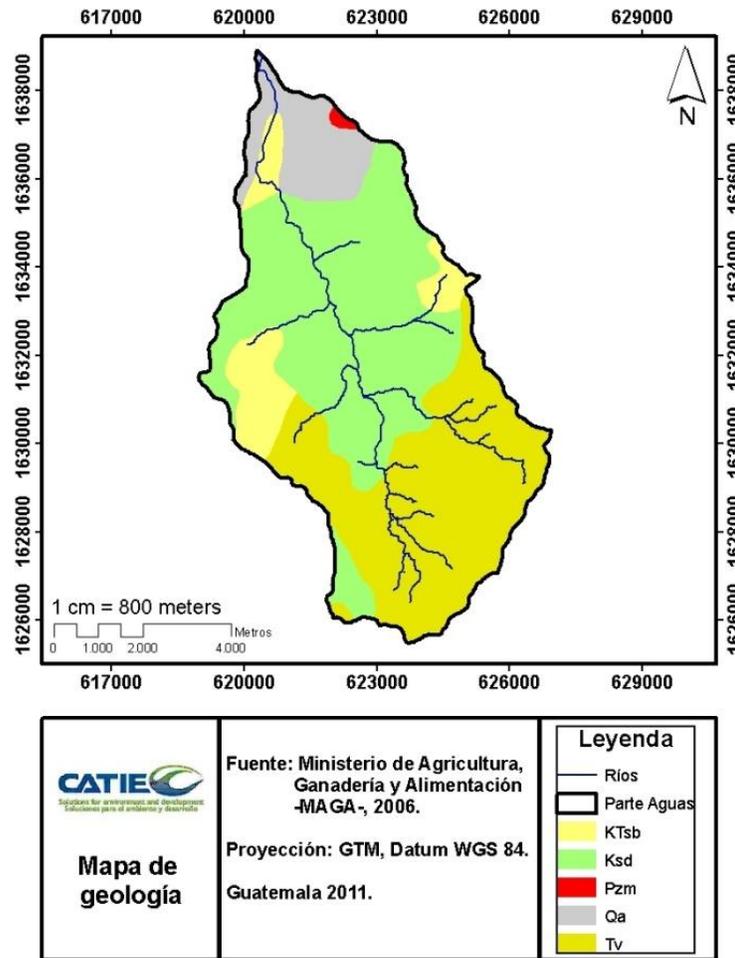


Figura 5. Mapa de geología de la microcuenca Torjá

Fuente: Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación

### g) Suelos

Los suelos de la microcuenca pertenecen en su mayoría al orden de los Entisoles, es decir suelos que no evidencian, o tienen escaso desarrollo de horizontes pedogenéticos. Este tipo de suelos solamente tiene un horizonte superficial claro, de poco espesor y generalmente pobre en materia orgánica (epipedón ócrico).

De acuerdo con la caracterización de suelos de Simmons *et al* (1959), se encuentran tres tipos de suelos (figura 6):

1. Suelos Jalapa (Jl), que son suelos desarrollados sobre materiales volcánicos, poco profundos, sobre materiales de color claro. Estos suelos están desarrollados en un relieve escarpado,

tienen drenaje interno bueno, son superficiales (profundidad entre 10 y 15 cm), de una capacidad de retención de agua muy baja, con alta vulnerabilidad a la erosión, y con una fertilidad natural regular.

2. Suelos Subinal (Sub), que son suelos desarrollados sobre materiales sedimentarios o metamórficos poco profundos sobre esquisto arcilloso y piedra caliza. Se presentan en terrenos con un relieve escarpado, su drenaje interno es bueno. Son suelos superficiales de poco grosor, presentan una baja capacidad de abastecimiento de agua y una vulnerabilidad alta a la erosión. Su fertilidad natural es mayor que los suelos de la clase Jalapa.

3. Suelos de los Valles (SV). Son los mejores suelos de esta microcuenca, son suelos formados en depósitos de los ríos que forman terrazas en las partes más bajas y cercanas al punto de aforo de la cuenca; esta clase presenta las mejores cualidades nutricionales (Simmons *et al.* 1959).

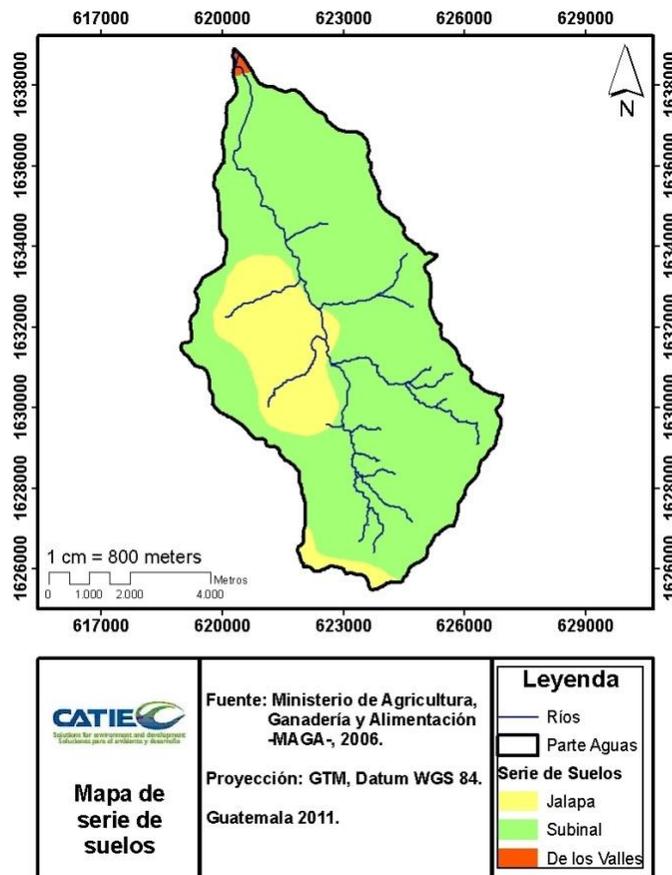


Figura 6. Mapa de series de suelos de la microcuenca Torjá

Fuente: Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación

## **h) Zonas de Vida**

De acuerdo con la clasificación de zonas de vida de Holdridge (De la Cruz 1975), en la microcuenca se encuentra principalmente la zona de vida denominada Bosque Húmedo Subtropical (templado) bh-S(t), que se caracteriza por presentar precipitaciones que oscilan entre los 1100 a 1349 mm anuales. El período en que las lluvias son más frecuentes corresponde a los meses de mayo a noviembre y la temperatura media anual varía entre 20 y 26 grados.

En la microcuenca también se encuentra la zona de vida Bosque Seco Subtropical (bs-S). Esta zona de vida de acuerdo a Holdridge (De la Cruz 1975) presenta precipitaciones que varían entre 500 y 1000 mm anuales, entre los meses de junio a octubre, y la temperatura oscila entre 19 y 24 °C.

## **i) División de la microcuenca**

Se dividió la microcuenca en tres zonas, con el fin de observar y diferenciar los sistemas agrícolas y la condición de sus suelos de acuerdo a cada zona. La zona alta se delimitó a partir de los 1220 msnm, ocupa una extensión de 18,9 km<sup>2</sup> con pendientes muy pronunciadas. En esta zona predominan remanentes boscosos. La parte media de la cuenca, se delimitó desde los 820 msnm hasta los 1220 msnm, en esta zona se encuentran los sistemas de producción agrícolas asociados al café con diferentes especies de sombra. La parte media tiene una extensión de 26,8 km<sup>2</sup>. En la parte baja que se delimitó desde los 820 msnm hasta el punto de salida del drenaje a 430 msnm, se observan procesos de sedimentación del material proveniente de la zona media y alta, en esta zona se encuentran las áreas con menores pendientes, especialmente en las terrazas recientes y antiguas del río; tiene una extensión de 11,2 km<sup>2</sup> y predomina el sistema agrícola de maíz (figura 7).

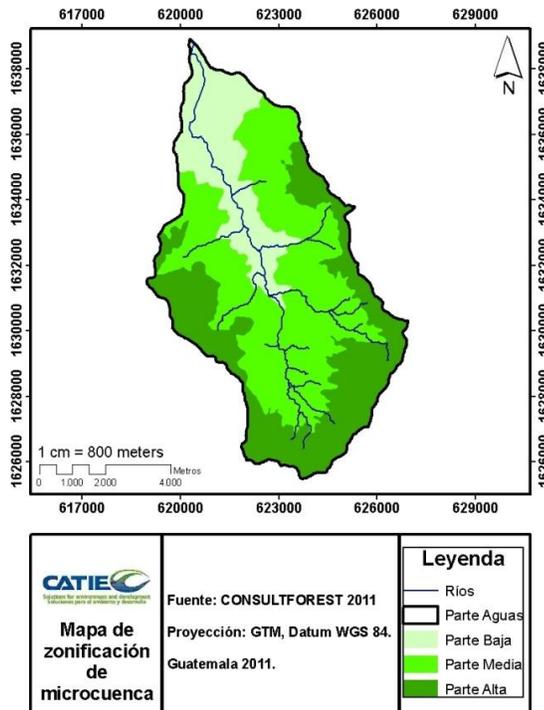


Figura 7. Zonificación de la microcuenca Torjá.

Fuente: Consultforest 2011

#### j) Capacidad de uso de la tierra

De acuerdo al método elaborado por el Soil Conservation Service de USA según el sistema propuesto por Klingebiel & Montgomery (1961), solamente unas pequeñas áreas en la subcuenca tienen un limitado potencial para cultivos anuales (clase III), aproximadamente un 48% tiene capacidad para cultivos perennes (clase IV), otro 48% de la subcuenca presenta severas limitaciones especialmente por la pendiente y profundidad del suelo, se clasifican dentro de las clases agrológicas VI y VII, por lo que su vocación es para pastoreo y silvicultura, para ambas clases agrológicas, pero con severas limitaciones para el caso de la clase agrológica VII. En la figura 8, se muestra el mapa con las capacidades de uso de acuerdo a la metodología de la USDA.

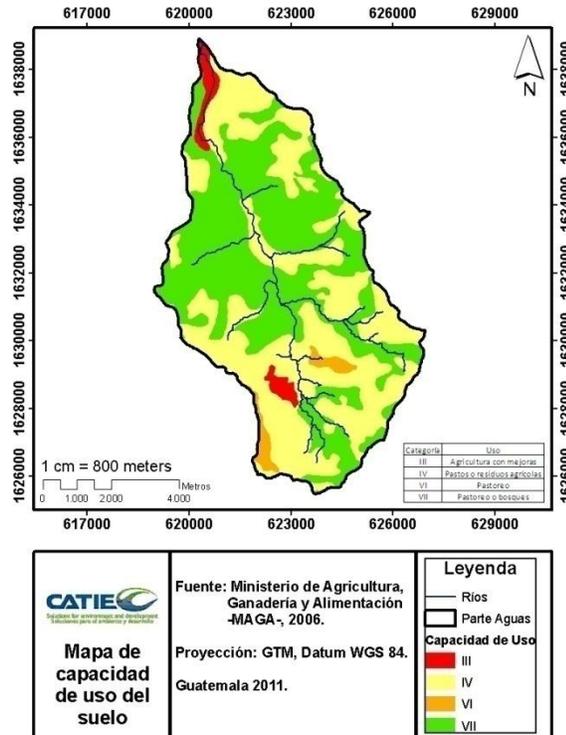


Figura 8. Capacidad de uso del suelo, según la metodología USDA, en la microcuenca Torjá  
Fuente: Ministerio de Agricultura ganadería y Alimentación 2006

### 3.3.2 Características socioeconómicas de la microcuenca

#### a) Demografía

El Instituto Nacional de Estadística con base en el XI censo poblacional y VI censo habitacional del año 2002, proyectó para el año 2010 en el municipio de Jocotán una población de 53957 habitantes y para la microcuenca del río Torjá una población de 12053 habitantes (208.24 habitantes/km<sup>2</sup>). En la microcuenca se encuentran 16 comunidades, el 49% de la población pertenece al sexo masculino y el 51% al sexo femenino.

#### b) Condiciones de vida en la microcuenca

De acuerdo a la caracterización y diagnóstico de la microcuenca realizada por la Mancomunidad Copán Chortí (2011), basados en los indicadores de la Encuesta Nacional de Condiciones de Vida (ENCOVI 2006), el 100% de la población en la microcuenca se encuentra en

condiciones de pobreza. Las causas más importantes de la pobreza, que menciona el diagnóstico son: falta de trabajo, pérdida de cosechas por sequías, alto costo de alimentos y pagos muy bajos.

### **c) Educación**

La escolaridad de la población de la microcuenca en general es muy baja: los niveles de analfabetismo en las comunidades de la microcuenca van desde 26% hasta 82%. Con relación al nivel educativo el 46% de la población en edad escolar, no cursó el primer grado de primaria, el 44% cursó la primaria, el 6% cursó el nivel básico y el 3% cursó el nivel diversificado (Mancomunidad Copán Chortí 2011).

### **d) Clasificación de agricultores por el tamaño de la propiedad sobre la tierra según IICA**

De acuerdo con la Mancomunidad Copán Chortí (2011), en la microcuenca existen tres tipos de agricultores (según la clasificación del IICA por el tamaño de la propiedad sobre la tierra): a) 35% de los agricultores se clasifican como de infra subsistencia, que poseen entre 0,1 y 1,40 ha; b) 2% de los agricultores se clasifican como de subsistencia, que poseen entre 1,40 y 3,50 ha; c) 0.9% de los agricultores se consideran como excedentarios, que poseen un área mayor a 3.5 ha pero menor de 7.0 ha. Además, el 53% de los productores en la microcuenca no poseen tierras y deben arrendar para cultivar. El 9% de los productores entrevistados no brindó información (Mancomunidad Copán Chortí 2011).

## **3.4. Selección y caracterización de los sistemas de producción agrícola**

Se identificaron los sistemas agrícolas más frecuentes e importantes para la subsistencia de las familias de la microcuenca, esto, con base en la información recabada durante la caracterización de la microcuenca, la observación directa de los sistemas, y la realización de entrevistas a los propietarios de dichos sistemas; a partir de este procedimiento se seleccionaron los sistemas de maíz de regadío y maíz de secano, y el sistema agroforestal de café con sombra, y posteriormente se ordenó la información en componentes biofísicos y agronómicos.

## **3.5 Análisis de la degradación de los suelos en los sistemas de producción agrícola**

Posterior a la selección y caracterización de los sistemas de producción agrícola, se procedió a la observación de las condiciones de degradación del suelo, por diferentes procesos superficiales

tales como erosión o desagregación. A continuación se presenta los procedimientos desarrollados en los sistemas agrícolas seleccionados.

### 3.5.1 Metodología para la observación de la erosión del suelo en el cultivo de café

#### 1) Selección de plantaciones de observación

Se seleccionaron plantaciones con café con los siguientes criterios:

- ✓ Se preseleccionaron plantaciones con apariencias vigorosas y en distintos rangos de pendientes.
- ✓ De la preselección anterior, se seleccionaron aleatoriamente plantaciones distribuidas en los rangos de pendientes de 0-30%, 31-60% y 61-75%. El 21% de la plantaciones tenía un rango de pendiente entre 0% y 30%, el 50% estaban en el rango de pendiente del 31% al 60%, y el 29% se encontraron en un rango de pendiente entre 61% y 72% de pendiente; a partir de esta información se seleccionaron aleatoriamente 3 plantaciones con el rango de pendiente de 0-30%, 7 plantaciones con el rango de pendiente de 31-60% y 4 plantaciones de 61-75% de pendiente, de manera que se seleccionó un número de plantaciones de manera proporcional a las frecuencias en que se encontraron en los rangos de pendientes establecidos.

#### 2) Establecimiento de parcelas de observación

Dentro de cada plantación seleccionada se implementó en un área representativa, una parcela de 3 x 3 metros (9 m<sup>2</sup>), dividida en sub parcelas de 0,25m<sup>2</sup> (36 sub parcelas). En cada sub parcela, se estimó la condición del suelo mediante los indicadores que se presentan en el cuadro 3.

Cuadro 3. Procesos y elementos observados en la superficie del suelo en las parcelas de observación

Superficie con erosión laminar (%)
Superficie con erosión en surcos o regueros (%)
Superficie de suelo desagregado (%)
Superficie estabilizada temporalmente (%)
Superficie con afloramientos rocosos o piedras (%)

Se estimó el porcentaje de cobertura de cada indicador, para lo cual se procedió a dividir cada sub parcela en cuadrantes, y a promediar los valores de los cuadrantes (ver figura 9). La suma de los porcentajes de las variables (indicadores) del cuadro 3 es el 100% en cada sub parcela.

### 3) Variables biofísicas consideradas en las parcelas de observación

Además de los procesos superficiales concernientes a la erosión hídrica, a los afloramientos rocosos y el suelo desagregado, descritos en el cuadro 3, también se observaron variables biofísicas relacionadas con dichos procesos superficiales. Estas variables observadas y sus unidades de medición se presentan en el cuadro 4.

Cuadro 4. Variables biofísicas consideradas en las parcelas de observación

Cobertura de material orgánico o mulch (hojarasca) (%)
Profundidad media de la capa de material orgánico (en cm)
Cobertura de hierbas (vegetación viva) (%)
Altura media de la cobertura de hierbas (en cm)
Suelo desnudo (%)
Cobertura de la sombra de café (%)
Cobertura de de las especies de sombra (%)
Altura media del dosel de sombra (en metros)

### 4) Procedimientos para la estimación de las variables biofísicas observadas

Se estimó de manera visual el porcentaje de cobertura de cada variable en cada sub parcela. Los procedimientos para la estimación de los porcentajes de cobertura son similares para todas las variables, (cobertura de material orgánico, suelo desnudo, y cobertura de vegetación) para lo cual se procedió a dividir cada sub parcela de 0,25 m<sup>2</sup> en cuadrantes para facilitar las estimaciones con mejor precisión (ver figura 9). Posteriormente se promediaron las estimaciones de cada uno de los cuadrantes. Para el caso de la cobertura de vegetación viva, se estimó la proyección de sombra de esta cobertura al suelo. Se estimaron independientemente las sombras de café y otras especies, para lo cual fue necesario observar las proyecciones de sombra sobre cada sub parcela, a veces se requirió estimar las sombras, observando desde el centro de cada sub parcela hacia arriba, (esta observación requiere recostarse para ver perpendicularmente desde el centro de la parcela hacia el cielo, y por lo tanto fue la última observación para no alterar las otras variables del suelo antes de su observación). Los valores de sombra obtenidos en estas parcelas de observación, fueron los valores

que se sometieron a análisis estadístico, y los valores de sombras de plantas típicas (inciso 4.1.5) constituyen una referencia para la caracterización del cultivo de café.



Figura 9. Sub parcelas de observación de variables biofísicas y procesos superficiales en el suelo en café

La profundidad de la capa de material orgánico o mulch se determinó mediante el promedio de dos mediciones con cinta métrica, una medición en la zona con mayor profundidad y la otra medición en la zona de menor profundidad en cada sub parcela. Para la determinación de la altura promedio de la vegetación viva, se realizó una apreciación visual de la vegetación más representativa en cada sub parcela, y se procedió a su medición con una cinta métrica.

Para la determinación de las alturas de los diferentes doseles de sobra, se realizaron mediciones con procedimientos aritméticos en individuos considerados típicos de los doseles presentes, los cuales sirvieron de referencia visual para la estimación de las alturas en cada parcela de observación. Las mediciones con procedimientos aritméticos se realizaron, con el uso de clinómetro y cinta métrica a través de la siguiente ecuación:

$$H = dh * \tan \alpha$$

Donde:

H= Altura del individuo (metros)

dh= Distancia horizontal del punto de observación al individuo (metros)

$\alpha$ = Ángulo desde el punto de observación hasta la cima del individuo (grados)

tan= Tangente

Dependiendo de la posición del árbol con respecto al punto de observación, se calculó la altura con las variantes que pueden darse en el campo.

### **5) Registro del manejo y variables físicas, en las fincas seleccionadas**

Para obtener información sobre el manejo del cultivo en las fincas seleccionadas, se entrevistaron a sus propietarios, y se preguntó sobre la percepción de la degradación y la productividad de sus suelos. Se obtuvo a través de entrevistas, la información del manejo de los agricultores a sus sistemas de producción. Los resultados se presentan en los incisos 4.1 y 4.2 de caracterización de los sistemas de producción agrícola representativos. Además se midieron las siguientes variables: pendiente, (con el uso de clinómetro), altura sobre el nivel del mar y coordenadas, (con GPS) y para el caso de las plantaciones de café, se procedió conjuntamente con cada propietario a hacer un conteo e identificación de los árboles de sombra presentes.

### **6) Determinación de las principales especies de sombra en las plantaciones de café**

El procedimiento para la estimación de las coberturas de sombra de las principales especies utilizadas para este fin, fue a través de la medición de la copa de una planta típica de cada especie (si existía más de una especie) en cada plantación, a través de la medición de la proyección de la sombra al suelo de los extremos del follaje, tomando 2 medidas, una medida en cada eje perpendicular, y se promediaron las medidas para la determinación de un radio promedio, con lo cual se estimó la sombra, con la ecuación del área de la circunferencia, ( $A = \pi r,^2$ ). A través del conteo de árboles en la plantación y el área de la plantación (la información del área fue proporcionada por el propietario), se determinó la densidad de plantas por hectárea. Para la estimación del porcentaje de sombra se utilizó la siguiente ecuación.

$$\text{Porcentaje de sombra} = \frac{\text{Sombra de la copa de la planta típica (m}^2\text{)} * \text{densidad (plantas/hectárea)}}{10000 \text{ metros}^2} * 100$$

### **3.5.2 Metodología para la observación de la erosión del suelo en los cultivos de maíz y frijol**

#### **1) Selección de plantaciones de observación**

Se diferenciaron 2 grandes grupos: a) maíz de regadío y b) maíz de secano. Dentro de estos grupos se diferenciaron las herramientas utilizadas para la siembra (piocha, azadón, chuzo), y se seleccionaron plantaciones en diferentes rangos de pendiente.

#### **2) Establecimiento de parcelas de observación**

En cada una de las plantaciones seleccionadas, se observó y registró la condición de la erosión a través de un muestreo sistemático alineado, de la siguiente manera:

- 1) Ubicados en el centro del cultivo, se procedió a su división en cuadrantes para la selección al azar de tres de los cuatro cuadrantes para ubicar en ellos las cuadrículas de observación.
- 2) Se ubicó aleatoriamente 1 cuadrícula de muestreo en cada cuadrante, ubicados en el centro de los cuadrantes, se utilizaron números aleatorios de distancias sobre los ejes X,Y. La coordenada obtenida correspondió al punto (0,0) de la cuadrícula. El tamaño de las cuadrículas fue de 60 x 60 cm.
- 3) En cada cuadrícula se hicieron lecturas a cada 10 cm en orden consecutivo, a partir del punto (0,0) con el uso de cintas y reglas métricas, al terminar las lecturas en una misma línea se volvieron a hacer lecturas en la siguiente línea (a 10 cm de distancia), de tal manera que se realizaron lecturas a un distanciamiento de 10 x 10 cm, para un total de 36 lecturas por cuadrícula de observación.
- 4) En cada cuadrícula (antes de las lecturas a cada 10 cm), se realizó un comentario en el que se describieron los procesos erosivos más evidentes y sus posibles causas, la estimación de cobertura vegetal viva o en proceso de descomposición y la última actividad agrícola realizada en la parcela.
- 5) Se identificó en cada uno de los 36 puntos de observación, el proceso que afectaba al suelo en la superficie (Blanco Sepúlveda 2011). En la figura 10 se ilustran los cuadrantes en el cultivo y la ubicación de las cuadrículas de observación.

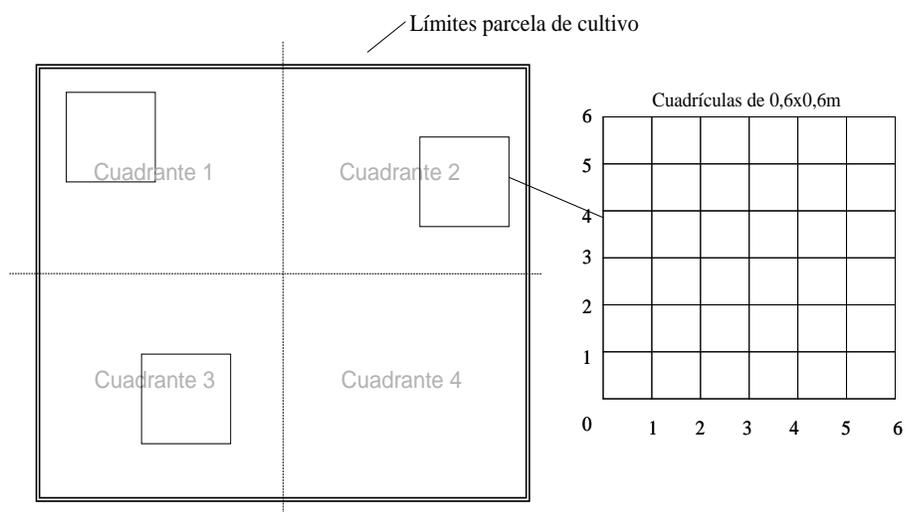


Figura 10. Esquema de ubicación de cuadrículas de observación en sistemas de maíz y frijol

Fuente: Blanco Sepúlveda 2011

En cada punto de la cuadrícula, se observaron los procesos en la superficie del suelo que se muestran en el cuadro 5.

Cuadro 5. Procesos y elementos observados en las cuadrículas de observación

Formas de erosión	Erosión laminar
	Erosión por salpicadura (impacto de lluvia)
	Erosión en surcos o regueros
Alteración mecánica en la superficie (suelo desagregado por herramientas agrícolas ó actividad de animales: lombrices, hormigas, gallinas)	Suelo desagregado erosionado
	Suelo desagregado susceptible de erosión
Deposición de sedimentos	Deposición de sedimentos con rasgos de erosión
	Deposiciones susceptibles de erosión
Superficie estabilizada temporalmente	Bajo material vegetal en descomposición
	Bajo suelo desnudo
Superficie con afloramientos rocosos	

- 6) Para el análisis de la información, los procesos se clasificaron en: procesos erosivos (erosión laminar y erosión en surcos), y sin rasgos de erosión.
- 7) Dentro de un cuadrante seleccionado para la realización de las observaciones, se buscaron regueros o cárcavas para su medición y posterior cálculo de la pérdida de suelo (en  $m^3/ha$ ), para lo cual se midió la longitud, anchura y profundidad de los surcos, regueros o cárcavas y con esta información se estimó la pérdida de suelo por este tipo de erosión (FAO 1997). En la figura 11 se muestra el esquema del procedimiento para la medición de regueros y cárcavas.

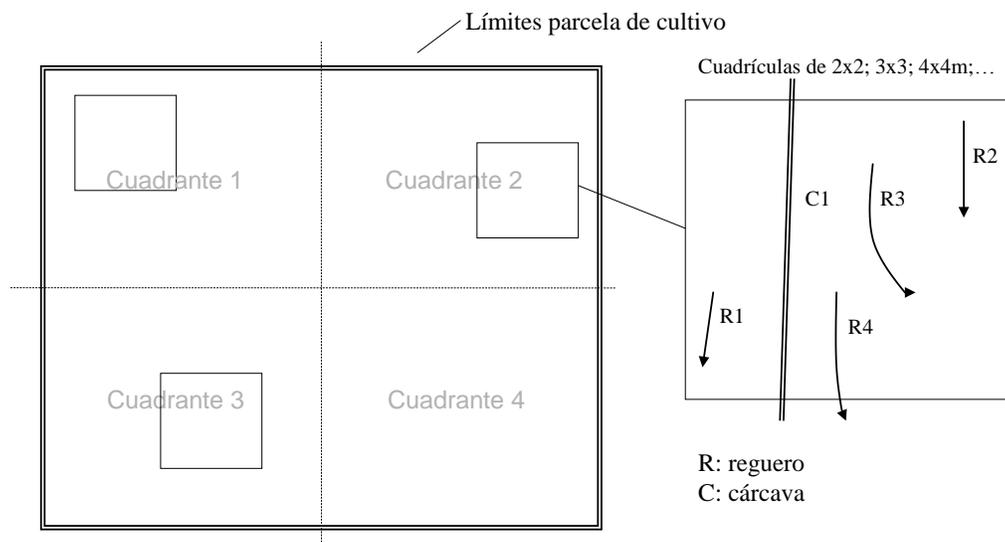


Figura 11. Esquema de procedimiento de medición de regueros y cárcavas

Fuente: Blanco Sepúlveda 2011

- 8) Dentro de un cuadrante seleccionado al azar se realizaron también dos tipos de transectos para las cuantificaciones siguientes:

- Transecto de cubierta vegetal, en el cual se cuantificó la vegetación viva y el resto se cuantificó como suelo. Este transecto consistió en una línea de 5 metros donde a cada 10 centímetros se observó si existía vegetación o no, y se cuantificó el número de puntos con vegetación.

- Transecto de cobertura en el suelo, en el cual al ras del suelo se cuantificó caña u otros restos vegetales, suelo desnudo, roca y otras. Este transecto consistió en una línea de 5 metros donde

a cada 10 centímetros se cuantificó sobre la superficie del suelo si existía caña, roca y los puntos donde no se cuantificó caña o roca se interpretó como suelo desnudo.

#### 9) Cuantificación de erosión laminar mediante uso de varillas de hierro

Para la estimación de la erosión laminar, con varillas de referencia, se siguió el siguiente procedimiento.

-Preparación de varillas de hierro de 1/8 de pulgada de diámetro y 30 cm de longitud, con cinta para aislar colocada a ocho centímetros de uno de los extremos de la varilla.

-Para instalar las varillas en el terreno, se procedió a ubicar una referencia en el centro del área de medición, que se constituyó en el eje de un plano cartesiano imaginario, se obtuvieron con números aleatorios, las coordenadas sobre los ejes “X” y “Y” y se colocaron las varillas en dichas coordenadas obtenidas al azar.

-Las varillas se introdujeron sobre el terreno hasta la altura de la cinta de aislar, con especial cuidado de profundizar hasta el límite inferior del anillo formado por la cinta adherida a la varilla en la parte baja de la dirección a la pendiente.

-Las lecturas de la erosión se hicieron con una regla graduada, y se midió en milímetros el movimiento del suelo (erosión) desde el límite inferior del anillo formado por la cinta de aislar hasta la superficie del suelo en la parte baja de la varilla con respecto a la pendiente, como se muestra en la figura 12.



Figura 12. Varilla de medición de erosión laminar colocada en la parcela de observación

En el terreno de medición se encontraron variaciones en la pendiente, por lo que se estimó la pendiente predominante en cada cuadrante. El análisis de la erosión se realizó con la totalidad de varillas disponibles al momento de la realización de las lecturas.

### 3.5.3 Obtención de muestras de suelo de los sistemas agrícolas

Conjuntamente con los propietarios de las plantaciones, se procedió a tomar dos muestras de cada plantación. La primera muestra se tomó de la capa superficial del suelo, la segunda muestra se obtuvo de la capa sub superficial, estas dos capas se diferenciaron por el cambio de coloración del suelo. Las muestras de suelos obtenidas en plantaciones de café, fueron trabajadas en el laboratorio de análisis de suelos del CATIE, en donde se determinó, el carbono orgánico por combustión, el contenido de potasio (K) y fósforo (P) por extracción en Olsen modificado, el contenido de calcio (Ca), magnesio (Mg), y acidez intercambiable por extracción en cloruro de potasio 1N y pH en agua, también se obtuvo el porcentaje de arena, de limo y de arcilla, y se determinó la textura (ver anexo 5).

Las muestras de suelos obtenidas en plantaciones de maíz y frijol, fueron analizadas en el laboratorio de suelos del departamento de Geografía de la Universidad de Málaga, España, en donde se realizaron los siguientes análisis: % de arena, % de limo G, % de limo f, % de arcilla, pH, % de  $CaCO_3$ , fósforo (P), carbono orgánico, humedad a 1/3 atm, humedad a 15 atm, agua útil, potasio (K), sodio (Na), calcio (Ca), magnesio (Mg), capacidad de intercambio catiónico (CIC), V (%).

Los procedimientos para los análisis fueron los siguientes: textura, se realizó por el método de la pipeta tras eliminación de la materia orgánica con  $H_2O_2$ , dispersión con polifosfato sódico y agitación mecánica por volteo (Loveland y Whalley, 1991). El pH, se midió potenciométricamente con electrodo de vidrio en una suspensión suelo:agua de 1:2.5 en un aparato Crison Digit 501. El  $CaCO_3$  equivalente, se determinó por ataque con  $ClH$  1:1 lectura de la presión de  $CO_2$  liberada en manómetros de agua y mercurio, según el método de Barahona et al (1984). El carbono y nitrógeno totales, se analizaron por combustión seca con un equipo automático LECO TruSpec-CN. Las Bases de cambio, se determinaron tras saturación con acetato amónico 1N pH 7 y medida en espectrómetro de absorción atómica VARIAN SpectrAA 220FS. La capacidad de intercambio catiónico, se determinó con acetato sódico 1N a pH 8.2 y medida del sodio en fotómetro de llama METEOR mod. NAK-II. El Fósforo asimilable, se determinó tras extracción con bicarbonato sódico y espectrofotometría (Olsen y Sommers, 1982). La humedad a 1/3 y 15 atm, se determinó mediante el método de la membrana de Richard (ver anexo 6).

#### **3.5.4 Análisis estadístico**

El análisis estadístico realizado consistió, primero, en un análisis de correlación entre las variables biofísicas observadas y los diferentes procesos en la superficie del suelo. Posteriormente se realizaron análisis de contrastes de medias y análisis de regresión para la obtención de modelos predictivos de los diferentes procesos superficiales, utilizando las variables biofísicas consideradas en las parcelas de observación.

## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En la microcuenca Torjá, de acuerdo a la observación directa efectuada para la identificación y caracterización de los sistemas agrícolas, el cultivo de café con sombra y el cultivo de maíz con frijol son los sistemas más representativos. A continuación se presenta la caracterización de estos sistemas agrícolas.

### **4.1 Caracterización del cultivo de café**

En la microcuenca el cultivo de café tiene aproximadamente 60 años desde que se establecieron las primeras plantaciones. En esta investigación las plantaciones estudiadas fueron

establecidas y han sido manejadas por sus actuales propietarios. En los cuadros 6 y 7 se presentan las edades y algunas características generales de las plantaciones estudiadas.

Cuadro 6. Edades de las plantaciones de café estudiadas de la microcuenca Torjá

Comunidad	Casos	Edad promedio (años)	Edad mínima (años)	Edad máxima (años)
Tituque	6	16	4	60
Tuticopote	8	6	3	12

Cuadro 7. Características generales de las plantaciones de café

Comunidad	Altura máxima (msnm)	Altura mínima (msnm)	Pendiente promedio	Ubicación en la microcuenca	Área promedio (ha)
Tituque	1098	1059	38	Parte media	0.21
Tuticopote	1223	1092	43	Parte media	0.25

#### 4.1.1 Régimen de propiedad

Las plantaciones seleccionadas se encontraron bajo el régimen de propiedad privada y son consideradas patrimonios familiares por su importancia en los ingresos familiares lo cual favorece el interés de sus propietarios en la conservación de sus suelos (Cubero Fernández 1994).

#### 4.1.2 Características agronómicas del café

A continuación se presentan las principales características de composición y arreglos del cultivo, en algunas plantaciones se encontraron dos y hasta tres variedades de café, entre ellas catuaí, caturra, pacamara, y arábigo, el café catimora fue el más común, encontrado en el 55% de las observaciones. En cuanto al arreglo se encontraron distanciamientos variables que determinan densidades aproximadas desde 3200 hasta 7160 plantas por hectárea. En el cuadros 8 se presentan, los distanciamientos, frecuencias y densidades en las plantaciones estudiadas.

Cuadro 8. Distanciamientos en las plantaciones estudiadas

Distanciamientos entre plantas y calles	Frecuencias	Densidad de plantas por hectárea
0,9 x 1,55	1	7168
0,9 x 1,6	1	6944
1 x 1,4	1	7143
1 x 1,5	1	6667
1 x 1,6	5	6250
1 x 1,9	2	5263
1 x 2	1	5000
1,2 x 2,6	1	3205
1,3 x 1,5	1	5128

#### 4.1.3 Altura de las plantaciones

La altura de las plantaciones varió considerablemente como consecuencia de diferencias en edad, variedad e historia de podas. En el cuadro 9 se muestran las alturas mínimas, máximas y promedio de las plantaciones de café.

Cuadro 9. Alturas de las plantaciones de café

Comunidad	Promedio (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)
Tituque	2,1	1,2	3
Tuticopote	2	1,1	3

#### 4.1.4 Historia de uso de las parcelas estudiadas

La historia de uso entre las parcelas seleccionadas es muy similar, pues antes del cultivo de café se sembró maíz y frijol en todos los casos. Sin embargo, el tiempo transcurrido desde la eliminación del bosque es muy variable como se muestra en cuadro 10.

Cuadro 10. Tiempo transcurrido en años desde que se eliminó el bosque

Comunidad	Promedio	Mínimo	Máximo
Tituque	32	11	60
Tuticopote	45	12	60

#### **4.1.5 Especies y cobertura de sombra en las plantaciones de café**

Las principales especies utilizadas para sombra de café en la microcuenca, son banano (*Musa sp*), y madre cacao (*Gliricidia sp*).

El banano fue la especie con mayor proyección de sombra, de acuerdo con las mediciones de las copas efectuadas en plantas típicas de esta especie en cada plantación, se estimó una área promedio de copa de 13 m<sup>2</sup> y una altura promedio de 5 metros, además se estimó una densidad media de 337 plantas por hectárea, que determina un porcentaje promedio de sombra de 43.8%. De acuerdo a la información proporcionada por los propietarios, la edad promedio fue de 4 años, con un promedio de cuatro podas (deshojes) por año. En todas las fincas las hojas podadas quedan en el terreno para su descomposición.

La sombra de madre cacao fue la segunda sombra de mayor cobertura. El 43% de las fincas tienen esta especie asociada con banano y en el 21% de las fincas observadas se encontró madre cacao sin banano. La densidad promedio estimada de madre cacao fue de 41 árboles por hectárea. El área media de copa de acuerdo con las mediciones efectuadas en plantas típicas de esta especie en cada plantación, fue de 36 metros cuadrados, que determina una sombra promedio aproximada de 15% con una altura promedio de 7 metros. La edad promedio se estimó en 7 años y el promedio de la frecuencia de podas fue menor a una poda por año. El 22% de los entrevistados permiten que las ramas podadas se descompongan e incorporen al suelo y el 78% restante utilizan el producto de la poda para leña.

#### **4.1.6 Fertilización**

El 65% de las parcelas se fertilizan dos veces por año, el 21% una vez al año y el 14% no se fertilizan; algunos agricultores combinan diferentes tipos de fertilizantes, y se estimó un promedio de aplicación de 8 quintales por hectárea en cada fertilización. Los productos aplicados se describen en el cuadro 11.

Cuadro 11. Frecuencia de uso de fertilizantes y cal en el cultivo de café en la microcuenca Torjá

Fertilizante	% de productores
<b>Úrea</b>	<b>35</b>
<b>15 N – 15 P – 15 K</b>	<b>11</b>
<b>20 N – 20 P – 0 K</b>	<b>7</b>
<b>16 N – 20 P - 0 K</b>	<b>19</b>
<b>Sulfato de amonio 21 N - 24 S</b>	<b>3</b>
<b>Cal (CaCO<sub>3</sub>)</b>	<b>4</b>
<b>Ferticafé 18 N - 6 P - 16 K - 1 Mg - 1.9 S – 1B ó 22 N - 0 P – 33 K - 1 Mg - 1.2 S – 1 B</b>	<b>7</b>
<b>No fertiliza</b>	<b>14</b>

En la mayoría de las parcelas los fertilizantes son incorporados al suelo con chuzo, para evitar el lavado por las lluvias; algunos productores aplican el abono en la superficie alrededor de la planta de café.

#### 4.1.7 Deshierbes

En todas las fincas se hace un control mecánico de malezas, su frecuencia varía de 1 a 3 y la media de deshierbes son dos por año. El 29% de productores manifestó realizarlo con azadón y el 71% con machete pando. El 14% de agricultores, además del control mecánico, aplican herbicidas aunque no brindaron información sobre los productos usados.

#### 4.1.8 Rendimientos

Los rendimientos promedios en cereza en las cosechas de los años 2009 y 2010 fueron 68 y 84 quintales por hectárea respectivamente. El 21% de los productores atribuyó la diferencia en la producción a la baja calidad del fertilizante que aplicaron en el 2009, otro 21% la atribuyó a las variaciones normales anuales del cultivo. Los productores explicaron que la producción del café se alterna bianualmente entre una “buena” y una “mala” cosecha, mientras el 58% explicó la diferencia aduciendo que el primer año de producción es un ensayo de las plantaciones y en el 2009 algunas plantaciones aún estaban ensayando, por lo que la producción fue mayor en el 2010. Ningún agricultor atribuyó la diferencia de rendimientos a la degradación del suelo, pero sí reconocieron la necesidad de mejorar la fertilización.

#### 4.1.9 Estado de degradación del suelo en el cultivo de café

Se estimó que el 16% del área observada se encontraba afectada por erosión laminar, el 30% se consideró superficie desagregada, que es un estado del suelo susceptible a procesos erosivos por la pérdida de la estructura original que le confería estabilidad. El 52% de la superficie se consideró no afectada por procesos erosivos (superficie estabilizada), al momento de la observación. El 2% de la superficie observada se cuantificó como superficie de rocas y solamente en una plantación, con el 61% de pendiente (el rango más alto de pendiente), se observaron procesos de erosión en surcos en el 1.9 % de su superficie, por lo que al promediar las parcelas de observación, se obtuvo un promedio de 0.13% de superficie afectada por erosión en surcos.

En el cuadro 12 se presentan los porcentajes de afectación en la superficie del suelo por los diferentes procesos erosivos, así como el porcentaje de superficie que al momento de la observación se presentaba estabilizada.

Cuadro 12. Superficies afectadas por diferentes procesos erosivos

Plantación	% Superficie estabilizada	% Superficie desagregada	% Superficie con erosión laminar	% Superficie con erosión en surcos
1	37	54	9	0
2	31	40	21	2
3	79	15	5	0
4	10	80	3	0
5	84	7	8	0
6	1	69	30	0
7	83	9	8	0
8	24	58	18	0
9	73	18	5	0
10	60	22	15	0
11	100	0	0	0
12	78	13	9	0
13	3	25	72	0
14	70	9	18	0
Promedio	52	30	16	0

Las variables biofísicas que se observaron en las plantaciones estudiadas, se presentan en el cuadro 13. Las columnas de % de superficie con hojarasca y % de superficie con vegetación herbácea, pueden unificarse y considerarse como cobertura vegetal; sin embargo durante las observaciones en campo se obtuvieron los valores de estas variables de manera independiente, lo

que permite presentar esta variable detallando si se trata de vegetación en descomposición o vegetación viva. De la misma manera se obtuvo de manera independiente la cobertura de sombra de las plantas de café, y la sombra de otras especies, en el cuadro 13 se unifican estas coberturas en la columna de suma de porcentajes de coberturas de sombras.

Los resultados que se presentan de carbono orgánico, se obtuvieron a partir de análisis de laboratorio y corresponden a la muestras de suelo superficial.

Cuadro 13. Variables biofísicas observadas en las plantaciones de café

Finca	% Afloramiento de rocas	% Superficie con hojarasca	% Superficie con vegetación herbácea *	Altura media de la vegetación herbácea (cms)	Suma de porcentajes de coberturas de sombras **	Pendiente promedio (%)	Altura media del café (mt)	Carbono orgánico superficial (%)
1	0	53	38	17	71	61	1	2.38
2	5	30	1	1	92	61	0	2.57
3	0	73	10	14	118	24	1	2.92
4	6	32	7	8	86	61	1	2.26
5	1	89	0	1	130	37	1	2.97
6	0	53	0	0	69	45	1	1.48
7	0	86	4	5	98	34	1	3.49
8	0	51	23	13	64	72	0	2.12
9	4	80	1	3	86	44	1	1.49
10	3	83	8	4	57	33	2	6.67
11	0	100	1	7	132	2	3	3.36
12	1	85	3	10	122	45	1	1.99
13	0	51	0	2	53	42	1	1.08
14	3	72	9	2	92	14	1	2.26
<b>Promedio</b>	<b>2</b>	<b>67</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>91</b>	<b>41</b>	<b>1</b>	<b>2.65</b>

\*Vegetación herbácea ó vegetación viva

\*\*Corresponde a la suma de las proyecciones de las sombras de todas las especies de sombra y también de la plantación de café

#### 4.1.10 Influencia de factores biofísicos sobre la erosión

Se determinaron correlaciones a través del análisis de correlación de Pearson entre las variables, erosión laminar, superficie desagregada, superficie estabilizada, y los factores biofísicos: cobertura herbácea, altura de la cobertura herbácea, cobertura de hojarasca (material orgánico en descomposición), altura del café, sombra, pendiente del terreno, afloramientos rocosos, y carbono orgánico del suelo. En el cuadro 14 se destacan las correlaciones significativas al nivel de significancia ( $p < 0,05$ ).

Cuadro 14. Cuadro de correlaciones entre procesos superficiales del suelo y factores biofísicos

Variables observadas	Indicador de degradación	Suelo estabilizada		Superficie con erosión laminar		Superficie desagregada	
		r	p	r	p	R	p
Cobertura herbácea		-0,1676	0,5668	-0,1786	0,5413	0,3702	0,1926
Altura de la vegetación herbácea		0,0698	0,8125	-0,3724	0,1898	0,201	0,4908
Cobertura de hojarasca		0,8761	4,00E-05	-0,3789	0,1816	-0,8347	0,0002
Altura del café		0,4849	0,0789	-0,2837	0,3256	-0,4075	0,1482
Sombra*		0,7588	0,0017	-0,5892	0,0266	-0,5696	0,0335
Pendiente		-0,6784	0,0077	0,1473	0,6154	0,7583	0,0017
Afloramiento rocoso		-0,1636	0,5763	-0,1990	0,4953	0,2587	0,3718
Carbono Orgánico del suelo		0,4	0,16	-0,34	0,23	-0,29	0,32

\* Incluye sombra del estrato arbóreo y la sombra de la plantación de café

Puede observarse en el cuadro 14, que las variables: cobertura de hojarasca, sombra y pendiente presentan correlaciones significativas con los diferentes procesos superficiales. Para los casos de la cobertura de hojarasca y la sombra, presentan correlación positiva con el suelo estabilizado y a la vez presentan una correlación significativa negativa con al menos un tipo de proceso superficial contrario a la estabilidad del suelo como lo es la erosión laminar o el suelo desagregado. Para el caso de la pendiente, presenta una correlación negativa, con el suelo estabilizado, y una correlación positiva con un proceso contrario a la estabilidad, como lo es el suelo desagregado.

#### 4.1.11 Suelo estabilizado temporalmente

El 52% de la superficie fue considerada estabilizada, es decir sin signos de algún proceso de erosión o desagregación al momento de la observación (julio y agosto). Esta condición se encontró relacionada con la cobertura de material orgánico (hojarasca), la sombra, y la pendiente.

#### 4.1.12 Relación entre la cobertura de material orgánico en descomposición y el suelo estabilizado

La cobertura de materia orgánica fue el factor que más se relacionó con el suelo estabilizado,  $r = 0,8761$ , y puede considerarse relevante para la planificación del manejo del suelo, como una condición que previene su degradación (Morgan 1997), al proteger la superficie contra el impacto directo de la lluvia, reducir el caudal de la precipitación que golpea la superficie por interceptación, impedir la desagregación del suelo, reducir la velocidad de la escorrentía, retener partículas de suelo,

mejorar la infiltración y percolación, y conservar la humedad del suelo (Gustafson 1957), (Morgan 1997), (Herweg 1998), (González Hidalgo 1998), (Lupe y Usaid 1998).

El material orgánico fue encontrado en diferentes grados de consolidación. En la figura 13 puede observarse el material orgánico suelto y superficial.



Figura 13. Material orgánico vegetal (hojarasca) suelto y superficial

En la figura 14 se observa el material orgánico en estado consolidado el cual se presentaba en forma de material adherido a la superficie y en una fase de incorporación al suelo, es decir, en proceso de descomposición parcialmente cubierto por suelo, o como un colchón, o sea una capa de espesor variable, en el que regularmente el suelo por debajo de él se encontró estabilizado.



Figura 14. Evidencia de estabilidad por el material orgánico vegetal en proceso de descomposición

En la figura 15 puede observarse el gráfico de dispersión con valores de los porcentajes promedios de superficie estabilizada y porcentajes promedios de cobertura de material orgánico en las 14 plantaciones observadas. Puede verse la relación positiva ( $r= 0,8761$ ) entre el material orgánico vegetal con la superficie estabilizada del suelo.

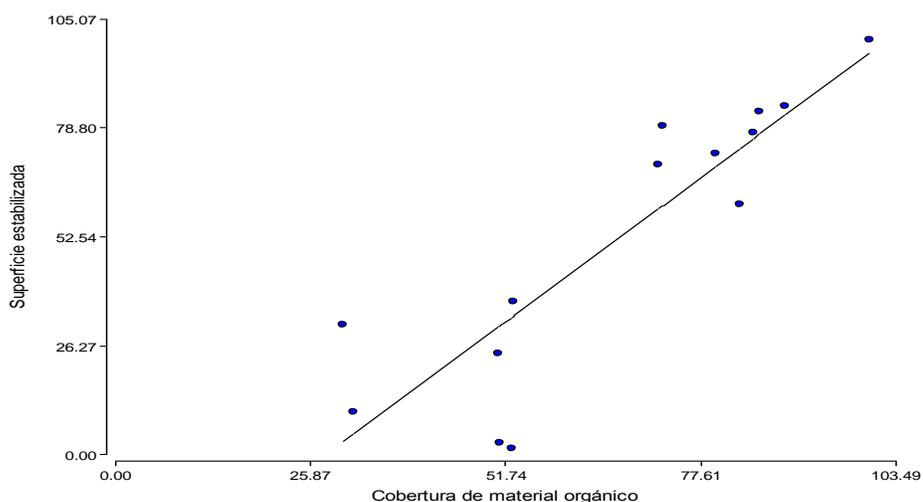


Figura 15. Relación de la cobertura de material orgánico con la superficie estabilizada

Se observó que las ramas de café podadas y dejadas en la superficie, favorecen la acumulación de material orgánico removido desde una parte más alta de la pendiente (figura 16). Bajo este material acumulado generalmente se encontró suelo que se determinó como temporalmente estabilizado. Se consideró la estabilidad de carácter temporal, pues dependiendo de

las lluvias o las actividades de manejo del cultivo, el suelo puede ser removido o alterado, modificando nuevamente su condición de estabilidad.



Figura 16. Acumulación de material orgánico por la acción de ramas y plantas de café

Otro signo de estabilidad del suelo fue la presencia de semillas germinadas (muchas veces de café) y el afianzamiento de las radículas en el lugar de la germinación (figura 17). Estas plántulas se observaron emergiendo del material orgánico de la superficie del suelo, lo cual indica una permanencia de la semilla en el sitio por el tiempo suficiente para germinar y desarrollar su sistema radicular. También la presencia de hongos o estructuras de hongos como hifas y el crecimiento de musgos, denotaron estabilidad temporal; generalmente estos indicadores también se observaron entre una capa de material orgánico.



Figura 17. Superficie con evidencia de estabilidad

#### 4.1.13 Efecto de la cobertura herbácea viva

De acuerdo al análisis estadístico, la cobertura herbácea (viva) no evidenció correlaciones significativas con las variables de degradación observadas y con la superficie estabilizada. Sin embargo, en las parcelas de observación pudo notarse la acción de esta vegetación como una barrera en la cual se acumula material orgánico de distintas dimensiones. Las plantas herbáceas de mayor tamaño son capaces de retener, pendiente arriba, materiales de dimensiones mayores a las retenidas por plantas de menor tamaño, y entre mayor es la cobertura de hierbas, la escorrentía superficial se ralentiza.

Probablemente el efecto de la cobertura herbácea (viva) no evidenció correlaciones por haberse hecho el análisis, separado de la vegetación en descomposición (mulch) como dos variables independientes. Por lo que al hacer análisis estadístico con estas variables unidas, se obtuvieron correlaciones significativas con la superficie estabilizada y con la superficie desagregada.

Puede destacarse que en el análisis de correlación, el valor de  $p$  entre la vegetación viva, (nombrada en este documento también como vegetación herbácea) unida con la vegetación en descomposición (hojarasca o mulch), con la erosión laminar es 0.09, con un valor  $r = -0.47$  que muestra una correlación negativa como se esperaba pero no fue significativo al nivel de significancia de  $p=0,05$ .

De acuerdo a Elwell y Stocking (1976) citados por Morgan (1997) para una protección adecuada, al menos el 70% de la superficie debe estar cubierta, aunque también menciona que se puede obtener una protección aceptable con el 40% de suelo cubierto. Sin embargo, los efectos de la vegetación no son totalmente simples y, bajo determinadas condiciones, la erosión puede verse potenciada por la cobertura vegetal.

En la figura 18 se ilustra una parcela de observación con vegetación herbácea viva y cobertura de hojarasca o mulch.



Figura 18. Cobertura vegetal viva y hojarasca en una parcela de observación de café

#### **4.1.14 Relación de la sombra con el suelo estabilizado**

De acuerdo al análisis de correlación de Pearson, se observó que la cobertura de sombra ofrecida por los diferentes doseles (estratos), es un factor con alta correlación positiva con el suelo estabilizado, con un valor de  $r = 0,7588$ . La protección que ofrecen los estratos de vegetación sobre el suelo, reducen el impacto, sobre todo si se considera que las plantaciones observadas, se componían de más de un estrato, (el estrato de café más la sombra) además las plantaciones de café eran frondosas lo que favorece la interceptación del agua. La protección contra el impacto de las lluvias, puede reducir la erosión laminar, la destrucción de los agregados, la colmatación con tierra fina y la reducción de la escorrentía (Herweg 1998).

Sin embargo también se conoce que la eficacia de una cubierta vegetal para reducir la erosión por impacto de las gotas de lluvia depende, de la altura y continuidad de la vegetación, y de

la densidad de cobertura del suelo. La altura de la vegetación es importante porque las gotas de agua que caen desde 7 m pueden alcanzar más del 90% de su velocidad terminal, además las gotas de lluvia interceptadas por la cubierta pueden unirse a otras en las hojas aumentando de tamaño y haciéndose más erosivas (Morgan 1997).

En la figura 19, se muestra el gráfico de dispersión con los volares de los porcentajes promedios de superficie estabilizada y porcentajes promedios de cobertura de sombra. Puede observarse la relación positiva, de tal manera que a mayor sombra también se observó mayor superficie estabilizada.

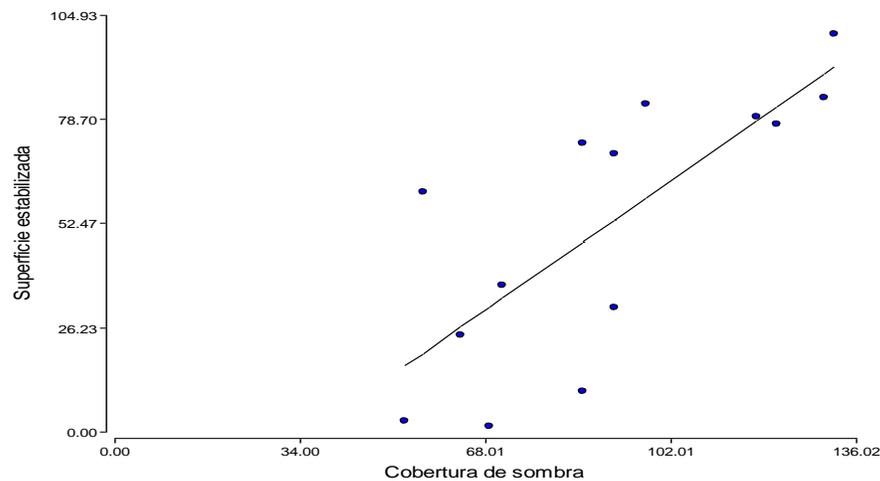


Figura 19. Relación de la sombra con la superficie estabilizada

#### 4.1.15 Relación de la pendiente con el suelo estabilizado

De acuerdo al análisis de correlación de Pearson el valor de  $r = -0,6784$  entre el suelo estabilizado y la pendiente, es decir, a mayor pendiente se observó menor superficie estabilizada, con la consecuencia que en la medida que se reduce la superficie estabilizada son mayores las superficies afectadas por erosión o con riesgo a la misma.

La pendiente es uno de los reguladores de la escorrentía más importantes, ya que determina la dirección y velocidad y dirige los procesos de desprendimiento, transporte y acumulación de las partículas del suelo. A medida que aumenta la pendiente y el largo de la pendiente, así aumenta la velocidad y el volumen del agua de escorrentía, y así su poder erosivo (Cubero Fernández 1994). (Herweg 1998).

En la figura 20, se muestra el gráfico de dispersión con los valores de los porcentajes promedios de superficie estabilizada y porcentajes promedios de pendientes en las 14 plantaciones observadas.

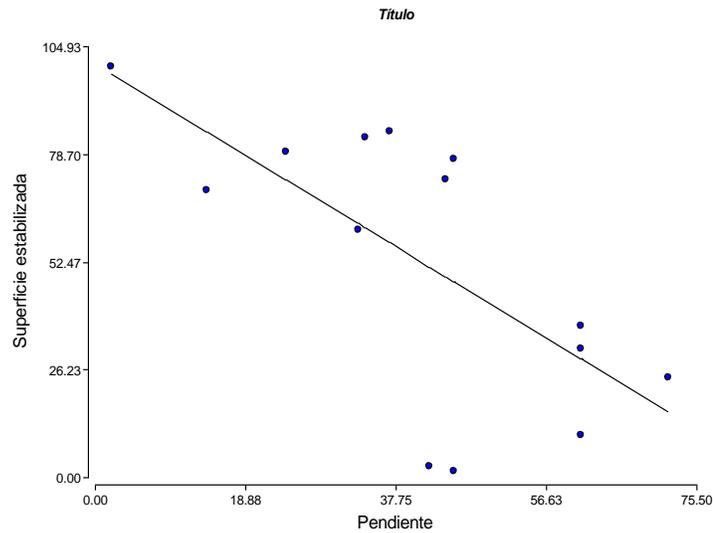


Figura 20. Relación de la pendiente con la superficie estabilizada

#### 4.1.16 Suelo afectado por erosión laminar

Se estimó que el 16% del área observada estaba afectada por erosión laminar, y que normalmente se encontraba desprovista de material orgánico (figuras 21, 22 y 23). También se observó erosión laminar al pié de tallos especialmente de banano, como consecuencia del denominado efecto de cascada (Blanco Sepúlveda 2011).



Figura 21. Superficie afectada por erosión laminar

Otros indicadores observados de erosión laminar, fueron las raicillas viejas expuestas, que indicaban que estuvieron bajo la superficie de suelo que fue erosionado, y las superficies que fueron alisadas (pulidas) por un flujo de agua laminar, (figuras 22 y 23)



Figura 22. Evidencia de erosión de tipo laminar

Superficie pulida y raíces expuestas en un área afectada por erosión laminar

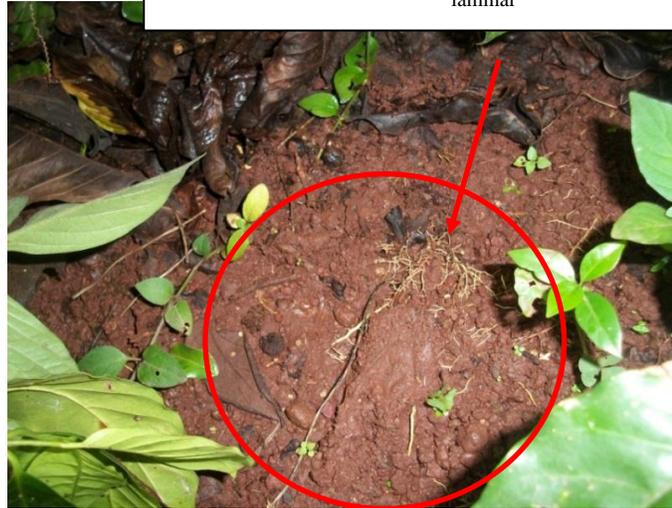


Figura 23. Evidencia de erosión laminar a través de superficies alisadas y raíces expuestas

#### 4.1.17 Relación de la sombra con la erosión laminar

En la figura 24, se muestra el gráfico de dispersión con los valores de los porcentajes promedios de superficie con erosión laminar y porcentajes promedios de cobertura de sombra en las 14 plantaciones observadas. De acuerdo al análisis de correlación de Pearson el valor de  $r = -0,5892$  entre el suelo con erosión laminar y la sombra. Puede observarse la relación negativa, de manera que a mayor cobertura de sombra, se encontró menor superficie afectada con erosión laminar.

La sombra del dosel también mostró correlación negativa con y el suelo desagregado, y una correlación positiva con la superficie estabilizada. Puede deducirse entonces, que la cobertura de la sombra en las plantaciones de café, es un factor a considerarse para la planificación de la conservación de suelos, en otros estudios debe contemplarse el efecto sobre la productividad del café.

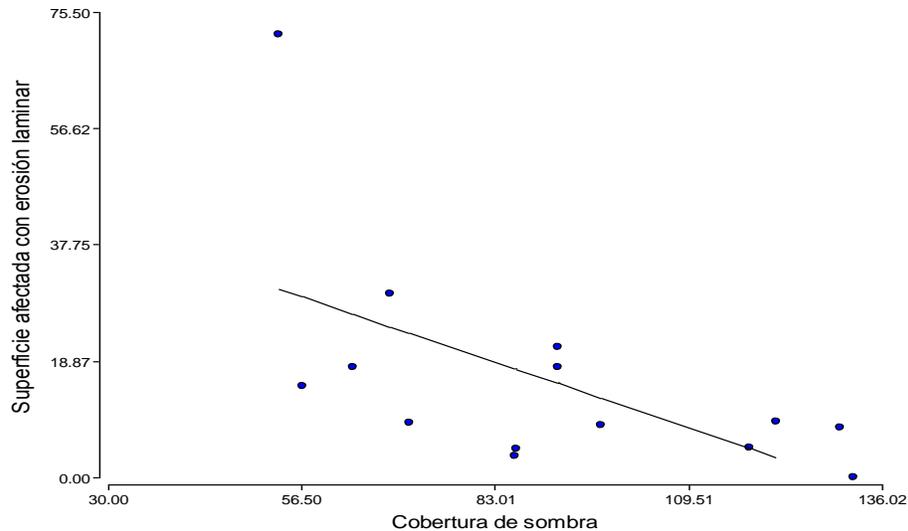


Figura 24. Relación de la cobertura de sombra con la superficie afectada con erosión laminar

#### 4.1.18 Suelo desagregado por alteración mecánica

Las áreas cuantificadas como desagregadas no representan un tipo de erosión, no obstante su condición le confiere una mayor susceptibilidad a ser erosionada (Blanco Sepúlveda 2011).

Normalmente las áreas desagregadas se observaron en áreas desprovistas de cobertura de material orgánico. Sus causas son diversas, como la desagregación por herramientas agrícolas utilizadas para el deshierbe, incluso desagregados por la acción de animales domésticos como gallinas, o por la acción de fauna del suelo como las hormigas.

Al momento de las observaciones en varias parcelas se había efectuado recientemente un trabajo de control de malezas. Para esta labor se emplea frecuentemente machete y pudo observarse que su uso, por la acción del raspado en el suelo, favorece la desagregación y rompimiento de la estructura del suelo

El 30,1% del área de las parcelas de observación se consideró desagregada. Se encontró que la cobertura de material orgánico es el factor que más se relaciona, en valores absolutos y de manera negativa con el suelo desagregado con un valor de  $r = -0,8347$  (ver cuadro 14).

En la figura 25 puede observarse la relación negativa entre la superficie desagregada y la cobertura de materia orgánica, a través del gráfico de dispersión con los valores de los porcentajes

promedios de superficie desagregada y porcentajes promedios de la cobertura del material orgánico en las 14 plantaciones observadas.

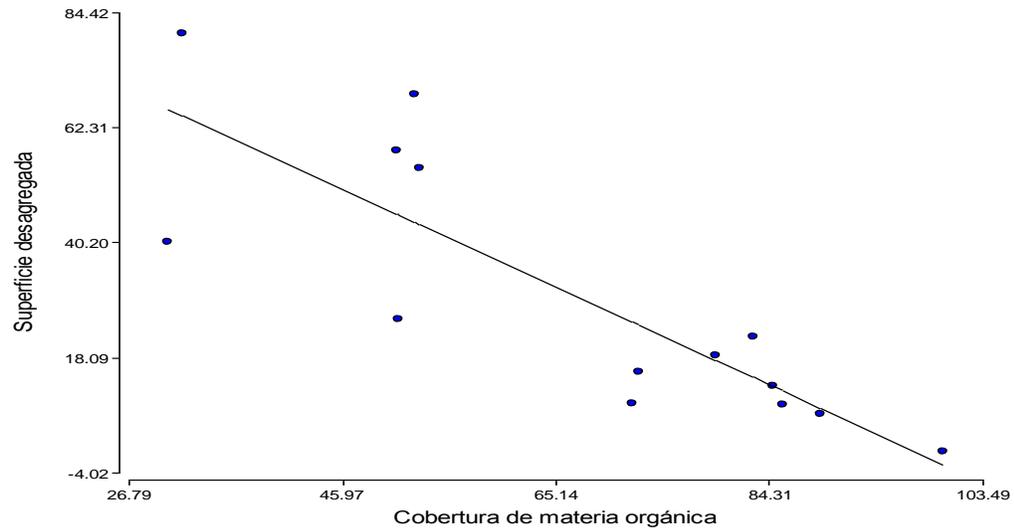


Figura 25. Relación de la cobertura de material orgánico con la superficie desagregada

#### 4.1.19 Relación de la sombra con el suelo desagregado

En la figura 26 se presenta el gráfico de dispersión con los valores de los porcentajes promedios de la superficie desagregada y los porcentajes promedios de sombra total. De acuerdo al análisis de correlación de Pearson el valor de  $r = -0,5696$ .

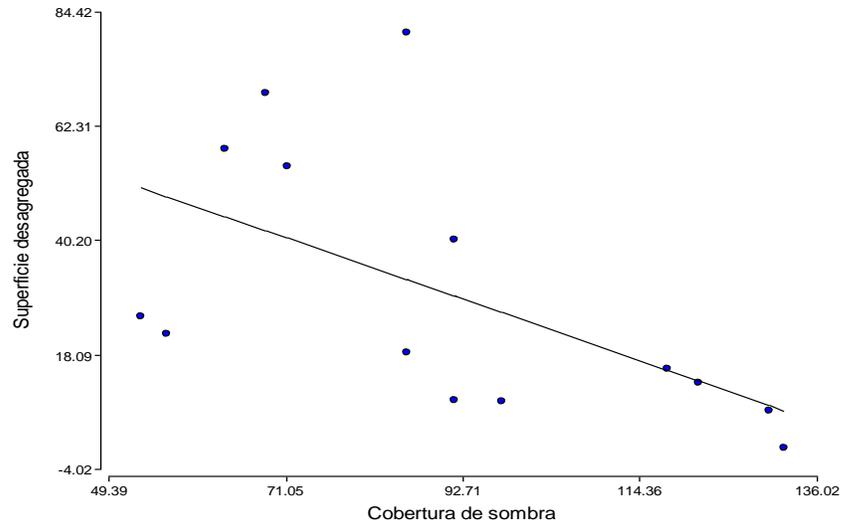


Figura 26. Relación de la sombra con la superficie desagregada

#### 4.1.20 Relación de la pendiente con el suelo desagregado

En la figura 27 se presenta el gráfico de dispersión con los valores de los porcentajes promedios de la superficie desagregada y los porcentajes promedios de pendiente en las 14 plantaciones observadas. De acuerdo al análisis de correlación de Pearson el valor de  $r = 0,7583$

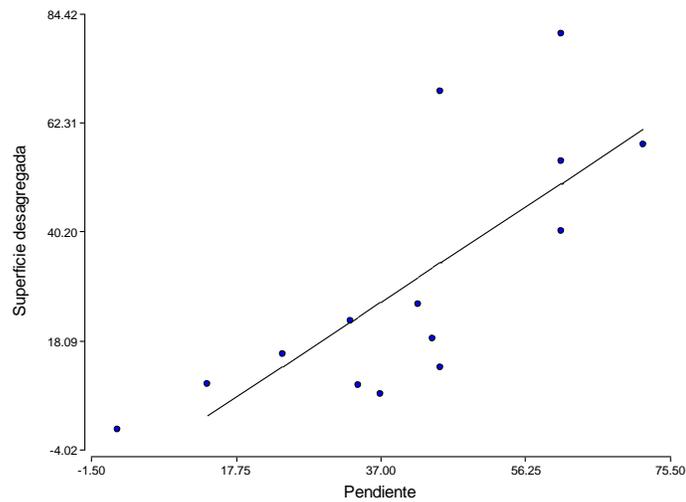


Figura 27. Relación de la pendiente con la superficie desagregada

A través de un proceso de depuración, se obtuvieron los modelos predictivos de superficie estabilizada y superficie desagregada, utilizando las variables observadas en las parcelas de observación. A continuación se presentan los modelos predictivos de los indicadores de degradación evaluados.

$$\text{Superficie estabilizada (\%)} = -15,6 + 1,16\text{MO} + 2,72\text{DOSEL} + (-0,01 * (\text{DOSEL})^2)$$

Donde:

MO= % de superficie de materia orgánica

DOSEL= % de cobertura de sombra

R<sup>2</sup>= 0.96

$$\text{Superficie desagregada (\%)} = 24,18 - 0,25\text{MO} + 0,35\text{M}$$

Donde:

MO= % de superficie de materia orgánica

M= % de pendiente

R<sup>2</sup>= 0.79

#### 4.2 Caracterización del cultivo de granos básicos

Las parcelas con cultivos de maíz y frijol en las que se realizó la investigación, se encuentran en la parte baja y media de la microcuenca, a alturas entre 716 y 1191 msnm, localizadas en las comunidades Potreros y Tunucó Abajo, ambas del municipio de Jocotán y las comunidades Tituque Abajo y Tuticopote Abajo del municipio de Olopa. En el cuadro 15 se presentan las coordenadas mínimas y máximas dentro de las comunidades en donde se establecieron parcelas de observación.

Cuadro 15. Coordenadas máximas y mínimas donde se establecieron parcelas de observación

Comunidad	Coordenada X mínima	Coordenada X máxima	Coordenada Y mínima	Coordenada Y máxima
Potreros	244600	244754	1631676	1632554
Tituque Abajo	245860	249549	1626939	1630197
Tunucó Abajo	245045	245357	1633115	1633470
Tuticopote Abajo	247028	247538	1629408	1629760

En la parte baja de la microcuenca se seleccionaron tres parcelas ubicadas en la comunidad Tunucó Abajo, y en la parte media se seleccionaron cinco parcelas en la comunidad Potreros, una parcela en la comunidad Tituque Abajo y seis en Tuticopote Abajo. En cada parcela se obtuvieron características biofísicas, observaciones de indicadores de degradación, y se efectuaron entrevistas con los propietarios de las fincas. En el cuadro 16 se presenta información general de las condiciones de las parcelas de investigación.

Cuadro 16. Características generales de las parcelas de investigación de granos básicos

Variable	Media	Mínima	Máxima
Altura msnm	999,32	716	1191
Pendiente media (%)	36,83	8	68
Tiempo de manejar la parcela (años)	7,75	1	30
Área de la parcela m <sup>2</sup>	2517,85	368,64	7372,8

#### 4.2.1 Régimen de propiedad

Las implicaciones de la condición del régimen de la propiedad sobre la degradación del suelo, se relacionan con el interés de los agricultores para implementar prácticas de conservación cuando el régimen de propiedad es privada, lo cual implica inversión de recursos, además de la reducción del área disponible para la plantación (CIAT 2005). La mayoría de las fincas estudiadas se encontraron en el régimen de propiedad privada individual; el 21% de las parcelas estudiadas eran arrendadas las cuales se encontraron en la comunidad Tunucó Abajo (cuadro 17).

Cuadro 17. Régimen de propiedad de las parcelas de granos básicos en la microcuenca Torjá

Comunidad	Régimen de propiedad	Frecuencia
Tunucó Abajo	Arrendada	21%
Tunucó Abajo	Privada	5%
Potreros	Privada	10%
Tituque Abajo	Privada	37%
Tuticopote Abajo	Privada	27%

#### 4.2.2 Rotación de cultivos

En la microcuenca el cultivo de maíz y frijol pueden presentarse como cultivos de rotación y asocio, en el sistema de rotación, se siembra el maíz al inicio de la época lluviosa y el frijol se siembra hasta el mes de septiembre, dentro de los rastrojos del maíz. El momento de siembra del

maíz depende de la caída de las primeras lluvias y de la preferencia de cada agricultor, ya que algunos siembran con las primeras lluvias, y otros esperan hasta que las lluvias sean más regulares, de manera que puede efectuarse durante todo el mes de mayo. El frijol se siembra después de la cosecha del maíz, desde inicios hasta la tercera semana de septiembre.

Solamente se encontró el sistema de maíz en asocio con frijol en lugares donde se aplica riego, en este sistema la siembra de maíz se realiza durante el mes de febrero y el frijol se siembra regularmente un día después.

En ambos sistemas el arreglo espacial de la siembra es tres hileras de frijol entre las filas donde se sembró el maíz.

#### **4.2.3 Formas de preparación de la tierra para la siembra**

El nombre local que se usa para la preparación de la tierra para la siembra es “guataleo”, y las herramientas que se utilizan son el machete denominado calabozo o machete de corte y el azadón, que se usan de manera combinada, debido a que también participan en la preparación del terreno otros miembros de la familia, especialmente los hijos. El 22% de los agricultores manifestó usar machete y azadón combinados, el 33% dijo utilizar sólo o principalmente machete, el 22% utiliza principalmente azadón, el 11% utiliza principalmente chuzo, y el 11% utilizan herbicidas, es decir, no labran la tierra. El chuzo es la herramienta utilizada para la siembra de las semillas.

En la comunidad Potreros existe un sistema de cooperación de trabajo denominado “mano vuelta”, que consiste en un equipo de varios agricultores que trabajan conjuntamente cada una de las fincas de los miembros del grupo hasta haber trabajado todas sus fincas. En este sistema los agricultores usan distintas herramientas durante la preparación del terreno.

#### **4.2.4 Control de malezas post-siembra**

Para el control de malezas se combinan herramientas con la aplicación de herbicidas de varias marcas comerciales como: Gramoxone, Hedonal, Gesaprin, Paraquat, Rotao, Ráfaga. Los agricultores que aplican herbicidas utilizan bombas de mochila, y normalmente realizan tres aplicaciones, la primera antes o pocos días después de la siembra en mayo, la segunda de cuatro a seis semanas después de la siembra (junio-julio) y la tercera a finales de agosto, esta última aplicación sobre todo tiene el propósito de preparar el terreno para la siembra del frijol en

septiembre. En sistemas en asocio, la aplicación de herbicidas es en el mes de febrero, justo antes de la siembra o unos pocos días después de la siembra, antes de la germinación del maíz y el frijol.

El control mecánico de hierbas o deshierbe, se realiza una o dos veces durante el ciclo del maíz con machete de corte o con machete pando. Cuando se combina el control químico con el mecánico primero se hace un deshierbe mecánico y después se aplica un producto que retarda los rebrotes de malezas.

#### **4.2.5 Fertilización**

Para la fertilización se aplica sulfato de amonio (21 N - 24 S), urea (46-0-0), triple 15 (15-15-15), o las fórmulas 20-20-0 ó 16-20-0. Los productos más usados son el triple 15 y urea. Normalmente los fertilizantes se incorporan al suelo pendiente arriba de la postura de maíz, haciendo un pequeño hoyo con el chuzo y en cual se deposita el fertilizante. Aunque es laborioso, los productores argumentan que de esta manera hay menos riesgo de lavado del fertilizante por la lluvia.

Para el caso de la fertilización del frijol se aplica triple 15, 20-20-0 ó 16-20-0 al voleo o asperjado mediante el uso de bombas de mochila.

#### **4.2.6 Ciclos de producción y descanso de la tierra**

Únicamente el 11% de los entrevistados mencionaron que alternan el cultivo de maíz con barbecho, que es un periodo de descanso durante el cual se deja el área sin cultivar y se permite la regeneración temporal de la vegetación natural. Los productores que practican el barbecho mencionaron un tiempo promedio de siembra de 6 años y un tiempo promedio de descanso de 3 años.

Se puede decir que el uso del barbecho en la microcuenca es reducido, lo cual puede relacionarse con la alta demanda de tierras para la agricultura debido a la alta densidad poblacional (208 hab/km<sup>2</sup>) y el tamaño reducido de las fincas como se muestra en la caracterización del cultivo de granos básicos (ver cuadro 16). Estos factores no permiten a las familias productoras disponer de área suficiente para destinar áreas al barbecho y permitir la recuperación de fertilidad de los suelos a través de períodos de descanso.

#### 4.2.7 Tiempo transcurrido desde la eliminación del bosque

La mayor parte de los productores entrevistados heredaron sus áreas de cultivos sin bosque; únicamente el 16% (3 casos) mencionó que en los terrenos donde cultivan hubo bosque y que lo habían reemplazado ellos mismos (cuadro 18). En dos casos el bosque fue reemplazado hace 10 años y en un caso hace 5 años.

Cuadro 18. Tiempo transcurrido desde la eliminación del bosque en parcelas de granos básicos

Comunidad	Tiempo promedio en años	Tiempo mínimo	Tiempo máximo
Potreros	29	12	45
Tituque abajo	18	10	25
Tunucó abajo	63	61	65
Tuticopote	50	5	65

#### 4.2.8 Aplicación de rozas

El 10.5% de los agricultores entrevistados usa fuego para la preparación del terreno antes de la siembra, aducen que a través de su uso se limpia el terreno y que facilita el trabajo de preparación y siembra, además se controlan mejor algunas plagas como las babosas, que afectan el cultivo del frijol. Los agricultores que no queman mencionaron como desventajas del uso del fuego que reduce la fertilidad del suelo y aumenta la erosión. Sin embargo, no todos los productores que usan fuego conocen los efectos adversos de la aplicación de rozas en los terrenos.

#### 4.2.9 Rendimientos

Los rendimientos del cultivo de maíz se estimaron a partir de la información brindada por los propietarios sobre la cantidad cosechada en quintales de maíz en las parcelas sembradas (Ver cuadro 19). El destino de la producción del maíz mayormente es para el autoconsumo, cuando el agricultor tiene un excedente generalmente lo usa para la venta.

Cuadro 19. Rendimientos de maíz en las parcelas de granos básicos

Comunidad	Rendimiento medio en quintales/ha	Rendimiento mínimo quintales/hectárea	Rendimiento máximo quintales/hectárea
Potrereros	46	39	54
Tituque Abajo	29	29	29
Tunucó Abajo	19	16	21
Tuticopote	52	21	81

#### 4.2.10 Estado de degradación del suelo en cultivos de granos básicos

Para determinar la condición actual de la degradación del suelo en las parcelas de maíz seleccionadas, se observaron indicadores de erosión hídrica y degradación favorecidos por la acción de factores biofísicos. Estos factores cambian constantemente la condición del suelo, por lo tanto, los valores de los indicadores observados tienen un carácter temporal (generalmente de corto plazo) y su condición cambia constantemente.

En el cuadro 20 se presentan los resultados de las observaciones de los indicadores de erosión y degradación, la herramienta utilizada para la labranza y la pendiente de cada parcela de observación.

Es importante tomar en cuenta que se valoró la erosión del suelo al principio de la estación de lluvias, que coincide con el inicio del cultivo. Esta etapa inicial es uno de los períodos más vulnerables para el suelo ya que la preparación del mismo para la siembra ha eliminado la cubierta vegetal viva. La única protección del suelo frente al impacto de la lluvia puede venir de los restos vegetales (materia orgánica en descomposición) del ciclo anterior.

Cuadro 20. Incidencia de indicadores de degradación en las parcelas de observación (mayo-junio 2011)

Parcela	Herramienta de labranza	% Erosión por salpicadura	% Erosión laminar	% Erosión en surcos	% Suelo desagregado	Pendiente
1	Azadón	16	53	0	6	29
2	Azadón	1	45	0	8	41
3	Azadón	0	43	0	0	70
4	Chuso	3	3	0	2	19
5	Machete	6	39	22	0	50
6	Chuso	24	24	0	0	40
7	Machete	26	30	9	0	40
8	Azadón	12	76	7	0	41
9	Machete	25	47	0	0	58
10	Machete	15	75	2	0	43
11	Machete	1	47	1	25	45
12	Herbicida	10	71	0	0	25
13	Azadón	6	85	10	0	68
14	Azadón	12	54	3	0	27
15	Azadón	2	50	0	0	29
16	Piocha	6	57	33	3	28

En el cuadro 21 se presentan los resultados de las observaciones de indicadores de procesos superficiales distintos a la erosión, así como la herramienta utilizada en la labranza y la pendiente de cada parcela de observación de cultivo de maíz.

Cuadro 21. Incidencia de indicadores relacionados con ausencia de erosión

Parcela	Herramienta de labranza	% Depositiones	% Cobertura vegetal muerta	% Sin erosión	% Rocas	% Otros	Pendiente
1	Azadón	23	0	0	3	0	29
2	Azadón	45	0	0	0	1	41
3	Azadón	31	0	0	0	0	70
4	Chuso	0	0	87	4	0	19
5	Machete	6	0	0	19	8	50
6	Chuso	10	0	26	14	0	40
7	Machete	20	0	0	12	2	40
8	Azadón	5	0	0	0	0	41
9	Machete	26	0	0	2	0	58
10	Machete	0	8	0	0	0	43
11	Machete	14	0	0	12	0	45
12	Herbicida	0	0	20	0	0	25
13	Azadón	0	0	0	0	0	68
14	Azadón	0	31	0	0	0	27
15	Azadón	49	0	0	0	0	29
16	Piocha	2	0	0	0	0	28

El cuadro 22 presenta los promedios de los procesos e indicadores observados en las parcelas de observación en el cultivo de maíz.

Cuadro 22. Promedio de los procesos e indicadores superficiales observados en el suelo

<b>Indicador de degradación</b>	<b>Porcentaje de observaciones</b>
<b>Erosión en surcos</b>	<b>5</b>
<b>Suelo desagregado</b>	<b>3</b>
<b>Deposición</b>	<b>14</b>
<b>Pisoteo</b>	<b>1</b>
<b>Resbalones por tránsito de personas</b>	<b>1</b>
<b>Materia orgánica en descomposición</b>	<b>3</b>
<b>Sin erosión</b>	<b>8</b>
<b>Roca/piedra</b>	<b>4</b>
<b>Erosión laminar</b>	<b>50</b>
<b>Erosión por impacto de lluvia</b>	<b>10</b>

Solamente el 11% de la superficie del suelo no mostró signos de erosión, sus indicadores fueron el suelo cubierto por materia orgánica en descomposición y el suelo desnudo pero que no presentó signos de erosión. Además, se estimó una superficie de rocas de 4% que no se consideró como erosión. Otro 5% de las observaciones mostraron una degradación mecánica, expresada en los indicadores: suelo desagregado, pisoteos y resbalones por tránsito de personas. Por otra parte, los indicadores de erosión se observaron en el 65% de la superficie, que evidencia una severa erosión en el cultivo de maíz en la zona. Los indicadores usados fueron: erosión en surcos, erosión laminar y erosión por impacto de lluvia. El indicador de degradación más frecuente fue la erosión laminar, cuya frecuencia se estimó en 50%, favorecido por la ausencia de protección de cobertura vegetal (materia orgánica en descomposición) durante las lluvias que cayeron previas al momento de la observación. El segundo indicador de erosión más frecuente fue la erosión por impacto de lluvia con el 10% de superficie afectada, y el 5% de superficie afectada por erosión en surcos. El 14% de las observaciones se identificaron como deposiciones, las cuales no se tipificaron como procesos de erosión, sin embargo, esta decisión es arbitraria, pues la deposición también se podría considerar una parte integral de la erosión laminar. Si se hubiera incluido la superficie del suelo afectada por deposición en la estimación total de la afectación por erosión hídrica, la situación hubiera sido más crítica aun.

La erosión en surcos en las parcelas de observación tuvo un amplio rango desde 0 hasta 93 m<sup>3</sup>/hectárea, y un promedio de 7 m<sup>3</sup>/hectárea.

La erosión en surcos se determinó mediante la ecuación:

$$\text{Erosión } m^3 = 3.142 * \text{longitud del surco (m)} * \frac{(\text{ancho promedio del surco (m)})}{2} * \frac{\text{Profundidad (m)}}{2}$$

#### **4.2.11 Análisis estadístico en el cultivo de maíz**

El tamaño del muestreo total es reducido con 3 parcelas en maíz de regadío y 10 parcelas en maíz de secano. De éstos últimos, una parcela fue manejada con piocha, el resto con azadón. Por este motivo, no se analizaron estadísticamente las diferencias de erosión que pueden presentar los diferentes sistemas y manejos agrícolas, pues el tamaño de muestreo sería reducido y dispar (n=3-1-9) (regadío-secano piocha-secano azadón).

El objetivo del análisis es determinar la influencia de los factores ambientales, pendiente, cobertura vegetal muerta y características y propiedades del suelo sobre la erosión. En este muestreo se encontraron dos tipos de erosión: laminar y surcos; y se ha podido cuantificar el volumen de pérdidas de suelo por la erosión en surcos. La hipótesis de análisis es demostrar que tanto una pendiente del terreno creciente como una cobertura vegetal protectora del suelo decreciente aumentan las tasas de erosión.

Debido a que se valoró la erosión al principio de la estación de lluvias, las observaciones en las 10 parcelas de maíz de secano, coinciden con el inicio del cultivo. Por esta razón, no se incluyen las muestras de maíz de regadío que tienen otro ciclo, ya que con el riego no es necesario ajustar la siembra con el período de lluvias, y en el momento del muestreo se encontraban en la etapa final del cultivo. Por lo tanto el muestreo válido tiene un tamaño de n=10.

#### **4.2.12 Análisis de aleatoriedad de los datos de las parcelas de maíz de secano**

La prueba de rachas indica que los valores de la distribución de todas las variables incluidas en el análisis son aleatorios ( $p > 0,05$ ), lo que pone de manifiesto la independencia de las observaciones (anexo 2).

#### **4.2.13 Análisis de la influencia de los factores, pendiente, cobertura vegetal y suelo sobre la erosión**

El análisis de correlaciones entre variables indica que hay diferentes relaciones significativas en función del tipo de erosión. Dado que la muestra es pequeña sólo se han destacado los niveles de significación  $p < 0,01$  y en el caso de que no hubiera relación a este nivel se ha bajado al nivel crítico  $p < 0,05$  (anexo 1).

La erosión laminar no presenta una relación significativa al nivel  $p < 0,01$  con ninguna variable, tan sólo al nivel  $p < 0,05$  con la pendiente de ladera ( $r = 0,738$ ;  $p = 0,016$ ) y con la retención de agua a 15 atm ( $r = 0,644$ ;  $p = 0,044$ ) (anexo1).

La erosión en surcos presenta una relación significativa al nivel  $p < 0,01$  con la cobertura del suelo (vegetación en descomposición) ( $r = -0,944$ ;  $p = 0,000$ ) (anexo 1).

La superficie no afectada por erosión no presenta una relación significativa al nivel  $p < 0,01$  con ninguna variable, tan sólo al nivel  $p < 0,05$  con la cobertura del suelo con vegetación en descomposición, ( $r = 0,679$ ;  $p = 0,031$ ) (anexo 1), lo que nos indica la importancia de la cobertura vegetal también en este sistema agrícola.

#### **4.2.14 Análisis de contraste de los tipos de erosión y los factores ambientales**

Se utilizó el test de Mann-Whitney para comparar las diferencias observadas en la superficie afectada por los tipos de erosión en función de las variaciones de los factores ambientales que han presentado una correlación significativa en el análisis de correlaciones. Se trata de una prueba no paramétrica que sustituye el estadístico t de Student para el caso de muestras que no se ajustan a la distribución normal (se recomienda para muestras de menos de 30 casos) (Blanco Sepúlveda 2011).

La simple observación de la distribución de los datos permite diferencias que la erosión en surcos se da en las parcelas de  $< 30\%$  de cobertura con vegetación (se establecieron grupos de suelos con base a este punto de corte). El análisis de contraste confirma que existe diferencias significativas ( $p = 0,008$ ) entre la erosión en surcos y la cobertura vegetal en descomposición con punto de corte en el 30% (cuadro 23). El diagrama de caja que representa la proporción de suelo afectado por erosión en surcos y suelo no afectado por erosión pone de manifiesto claramente las diferencias indicadas (figura 27). Los suelos con  $< 30\%$  de cobertura vegetal presentan una erosión en surcos que afecta al 9% (mediana) de la superficie y no presenta suelo no afectado por erosión. Por el contrario, los

suelos con >30% de cobertura vegetal no presentan erosión en surcos y la superficie de las parcelas no afectada por erosión asciende al 19.7% (mediana).

Obviamente el volumen de suelo perdido también resulta significativo ( $p=0,048$ ) (cuadro 23) aunque se encuentra en el límite.

El análisis de contraste confirma el análisis de correlación que indicaba que no había relación entre la erosión laminar y la cobertura vegetal del suelo ( $p=1$ ) (cuadro 23).

Cuadro 23. Análisis de contraste entre la cobertura vegetal con tipos de erosión y volumen de suelo perdido (test U de Mann-Whitney)

Estadísticos de contraste <sup>b</sup>					
	Erosión laminar (%)	Erosión surcos (%)	Erosión total (%)	Volumen suelo perdido (m3/ha)	No erosión (%)
U de Mann-Whitney	12,000	,000	3,000	3,000	3,000
W de Wilcoxon	27,000	15,000	18,000	18,000	18,000
Z	-,104	-2,694	-1,991	-2,117	-2,117
Sig. asintót, (bilateral)	0,917	0,007	0,047	0,034	0,034
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	1,000 <sup>a</sup>	,008 <sup>a</sup>	,056 <sup>a</sup>	,056 <sup>a</sup>	,056 <sup>a</sup>
<b>Sig. exacta (bilateral)</b>	<b>1,000</b>	<b>0,008</b>	<b>0,056</b>	<b>0,048</b>	<b>0,048</b>
Sig. exacta (unilateral)	0,500	0,004	0,028	0,024	0,024
Probabilidad en el punto	,079	,004	,012	,020	,020

a. No corregidos para los empates.

b. Variable de agrupación: Cobertura vegetal muerta con punto de corte en el 30% (Grupos\_30%rv)

En la figura 28, se muestra la distribución de la superficie de suelo afectada por erosión en surcos (rojo) y no afectada (verde) en cultivos de maíz con diferente cobertura vegetal.

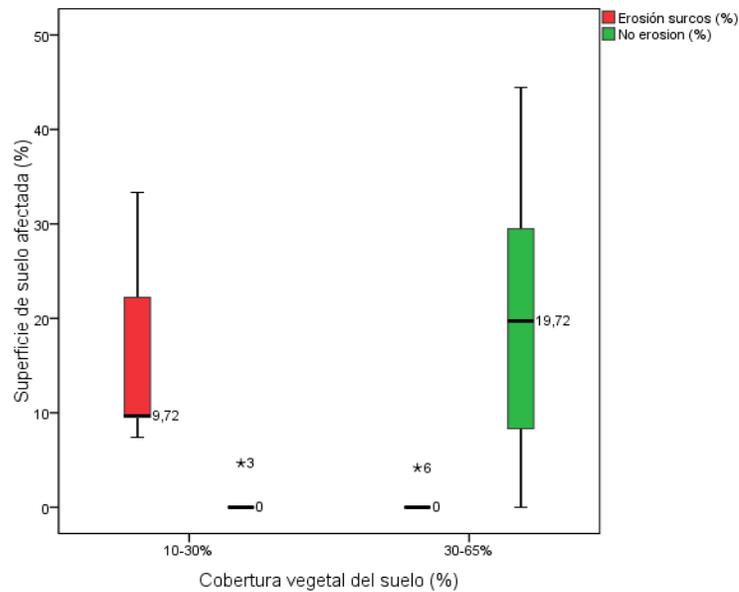


Figura 28. Suelo afectado por erosión en surcos con diferentes coberturas de vegetación

#### 4.2.15 Análisis de contraste entre la erosión laminar y la pendiente de ladera

Los puntos de corte de la pendiente del terreno para establecer los grupos de suelos han sido los siguientes:

Grupo 1. Se establecieron 2 puntos de corte (30 y 50%) y 3 grupos (<30%, 30-50%, >50%).

Grupo 2. Se estableció 1 punto de corte (30%) y 2 grupos (<30% y >30%).

Grupo 3. Se estableció 1 punto de corte (40%) y 2 grupos (<40% y >40%).

Grupo 4. Se estableció 1 punto de corte (50%) y 2 grupos (<50% y >50%).

La erosión laminar no resultó significativa al nivel crítico  $p < 0,05$  en ninguno de los grupos establecidos, aunque el que más se aproximó fue el grupo de pendiente 2 con el punto de corte en el 30% de pendiente. Los niveles de significación fueron los siguientes:

Grupos pendiente 1 ( $p=0,143$ ).

Grupos pendiente 2 ( $p=0,067$ ).

Grupos pendiente 3 ( $p=0,114$ ).

Grupos pendiente 4 ( $p=0,267$ ).

#### 4.2.16 Análisis de la influencia de la cobertura vegetal del suelo (vegetación en descomposición) sobre la erosión en surcos y el volumen de suelo perdido

El análisis de correlaciones entre variables indicó que la erosión en surcos y el volumen de suelo perdido presentó una relación significativa a un nivel crítico de  $p < 0,01$  con la cobertura del suelo con vegetación en descomposición (ver anexo 1). El análisis de regresión lineal confirma esta relación. La cobertura de vegetación en descomposición (CS\_rv), como variable de predicción de la erosión en surcos y del volumen de suelo perdido, presenta un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,66 ( $p=0,004$ ) para ambos casos (ver anexos 3 y 4). El 66% de de los valores de erosión en surcos y de suelo perdido pueden ser explicados a partir de la cobertura vegetal, mostrando una clara relación lineal negativa (figuras 29 y 30).

Las ecuaciones de regresión resultantes son las siguientes:

$$\text{Erosión en surcos} = 29,63 - 0,562 \text{ CS\_rv}$$

$$\text{Pérdida de suelo (m}^3\text{ha}^{-1}\text{)} = 14,87 - 0,294 \text{ CS\_rv}$$

Diagrama de dispersión y recta de regresión de la relación entre la erosión en surcos y los restos vegetales en superficie en cultivos de maíz

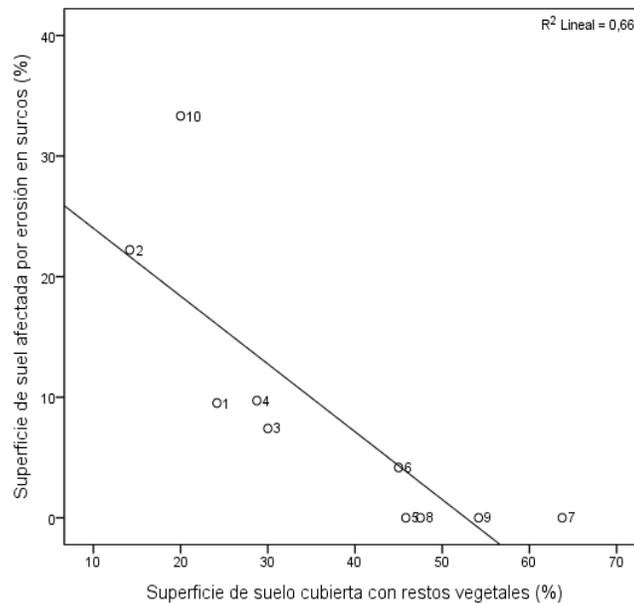


Figura 29. Relación de la superficie afectada por erosión en surcos y cobertura vegetal muerta

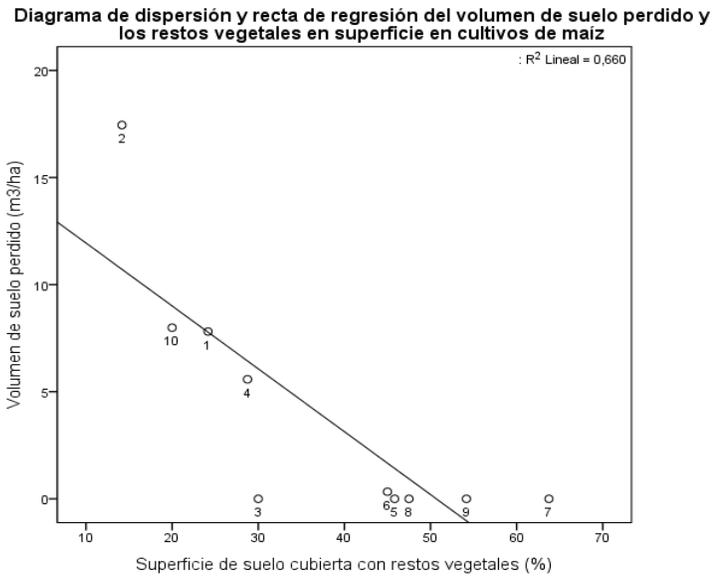


Figura 30. Relación del volumen de suelo perdido y cobertura vegetal muerta

#### 4.2.17 Volumen de suelo perdido por erosión laminar determinado con varillas (clavos) de hierro

A través de la medición del nivel del suelo, a través de varillas de hierro, se calculó la dimensión de la erosión de tipo laminar en un período de 28 días desde el 21/07/2011 al 17/08/2011. En el cuadro 24 se presentan los resultados de la totalidad de varillas instaladas en el área de observación, y en los cuadros 25 al 28 se presentan los resultados de las varillas agrupadas en cuadrantes, con el propósito original de observar la influencia de la pendiente, sin embargo a simple vista puede verse que, la pendiente no fue el único factor que influyó en la erosión, por lo que no fue determinante sobre los resultados de erosión. Probablemente la ubicación de los clavos en la ladera, o los resultados de las labores agrícolas fueron otros factores que influyeron sobre la erosión.

Cuadro 24. Estimación de la erosión laminar en la parcela de observación con varillas de hierro

Área en metros cuadrados de la parcela	1382 m <sup>2</sup>
Promedio de erosión	0.0025 m
Erosión /Hectárea	25 m <sup>3</sup> /ha

En el cuadrante que se presentan a continuación, la pendiente predominante determinada fue de 37% los resultados de erosión fueron los siguientes.

Cuadro 25. Estimación de la erosión laminar en el cuadrante 1 con el uso de varillas de hierro

<b>Promedio erosión (mm)</b>	<b>3.5</b>
<b>m3/ha</b>	<b>35</b>
<b>Observaciones (clavos)</b>	<b>8</b>

En el siguiente cuadrante, la pendiente predominante determinada fue de 65%, y los resultados de erosión se presentan a continuación.

Cuadro 26. Estimación de la erosión laminar en el cuadrante 2 con el uso de varillas de hierro

<b>Promedio erosión (mm)</b>	<b>2.2</b>
<b>m3/ha</b>	<b>22</b>
<b>Observaciones (clavos)</b>	<b>13</b>

En el cuadrante 3, la pendiente predominante se determinó en 46%, y los resultados de erosión se presentan a continuación.

Cuadro 27. Estimación de la erosión laminar en el cuadrante 3 con el uso de varillas de hierro

<b>Promedio erosión (mm)</b>	<b>3.6</b>
<b>m3/ha</b>	<b>36</b>
<b>observaciones (clavos)</b>	<b>10</b>

En el cuadrante 4, la pendiente predominante se determinó en 52%, y los resultados de erosión se presentan a continuación

Cuadro 28. Estimación de la erosión laminar en el cuadrante 4 con el uso de varillas de hierro

<b>Promedio erosión (mm)</b>	<b>0.1</b>
<b>m3/ha</b>	<b>1</b>
<b>Observaciones (clavos)</b>	<b>5</b>

## 5. CONCLUSIONES

1. Las metodologías aplicadas permiten estimar la afectación de la superficie del suelo por diferentes procesos erosivos en plantaciones de maíz y de café de manera rápida y diferenciar los factores biofísicos que la influyen.
2. Se encontró para el caso del cultivo de café una superficie afectada por erosión laminar del 16% y una superficie desagregada (potencialmente en riesgo de sufrir erosión) del 30%, para un total de 46% de la superficie del suelo. Por otra parte, el 52% de la superficie se encontró estabilizada y 2% estaba cubierta por rocas. En caso de parcelas de maíz, se encontró una superficie del suelo afectada por erosión laminar del 50%, erosión en surcos del 5%, una superficie desagregada (potencialmente en riesgo de sufrir erosión) del 3%, una superficie con deposiciones de material erosionado del 14%, mientras el 2% es afectada por pisoteo de personas y el 10% muestra el impacto de la lluvia. En total, estos indicadores de erosión actual o potencial suman el 84% de la superficie del suelo. Al comparar los resultados obtenidos en parcelas de maíz con los del cultivo de café, resulta evidente que el cultivo de café produce menos erosión hídrica que el cultivo de maíz, al menos, en la fase inicial del cultivo de maíz.
3. La cobertura del suelo con material vegetal vivo o en descomposición, es el factor que tuvo la correlación más alta con la superficie del suelo estable y por lo tanto, que más controla la erosión hídrica al proteger la superficie del suelo contra el impacto de las gotas de lluvia, reducir la velocidad de la escorrentía y atrapar las partículas de suelo removidos por la erosión en otras partes de las parcelas.
4. Otros factores que explican una mayor afectación del suelo por erosión hídrica son una mayor pendiente del terreno y una menor cobertura de los estratos que brindan sombra al café.
5. Se estimó que en las parcelas de maíz la pérdida promedio de suelo a través de regueros es de 21.8 metros cúbicos por hectárea, lo cual se calculó a partir de los regueros que fueron formados durante las lluvias que cayeron en días anteriores a la observación. En el cultivo de café no se estimó el volumen de suelo perdido por la erosión en surcos, pues únicamente se estimó que el 0.1% de la superficie evaluada se encontraba afectada por este tipo de erosión, comparado con el 5% de la superficie que se consideró afectada por este tipo de erosión en el cultivo de maíz.

## **6. RECOMENDACIONES**

1. Se recomienda divulgar las metodologías aplicadas entre investigadores y técnicos agropecuarios de manera que puedan aprovecharlas para el reconocimiento rápido y relativamente barato de indicadores de erosión del suelo a nivel de campo.
2. Las conclusiones del presente estudio, sobre todo para el cultivo de maíz, tienen un alcance limitado debido a la reducida cantidad de muestras. Por lo tanto, se recomienda que las conclusiones sean confirmadas en futuras investigaciones con datos de una mayor cantidad de parcelas, en otros momentos del cultivo y con diferentes formas de manejo. Además, es posible que estudios con mayor número de casos confirme o encuentre relaciones esperadas pero no encontradas en este estudio.
3. Se recomienda como medida de gestión para el control de la erosión y la degradación en la microcuenca, la aplicación de prácticas que aumenten la cobertura del suelo como la labranza conservacionista, labranza mínima o labranza cero y diferentes opciones para el manejo de rastrojos. Además, estas prácticas tienen como ventajas adicionales que mejoran la estructura del suelo, el reciclaje de nutrientes y, comparadas con la construcción de estructuras de conservación de suelos, requieren una menor inversión de recursos y no implican la reducción de áreas efectivas de cultivo.
4. Los productores no consideraron que la erosión influyera sobre los rendimientos de sus cultivos, únicamente relacionaron la productividad de sus suelos con la fertilización, lo que muestra claramente la necesidad de más capacitación a los productores de la microcuenca en el tema de erosión del suelo.
5. En un taller de divulgación de los resultados del presente estudio, resultó evidente que los productores reconocen la mayoría de los indicadores de erosión y son capaces de generar ideas que les pueden permitir plantear acciones para el manejo más sostenible de sus suelos. Por esta razón, se recomienda estimular más la discusión con y entre productores sobre la degradación del suelo, pues se espera que con mayores conocimientos, ellos serán más anuentes a la implementación de mejores tecnologías (Cubero Fernández 1994).

## 7. LITERATURA CITADA

- Barahona, E., Iriarte, A. 1984. Determinaciones analíticas en suelos. Normalización de métodos IV. Determinación de carbonatos totales y caliza activa (Grupo de trabajo de normalización de métodos analíticos) En: Actas del I Congreso de la Ciencia del Suelo. Madrid I. p. 53-69
- Blanco Sepúlveda, R. (coord). 2011. Manual provisional para la evaluación de campo de la degradación del suelo por la actividad agraria a escala de finca en las montañas de Centroamérica. Universidad de Málaga, España (UMA) – Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) s.p.
- Castillo, JB. 1965. Manual de levantamiento de suelo. República de Venezuela, Ministerio de Agricultura y Cría, Dir. de Recursos Naturales Renovables, Div. de Protección y Parques Nacionales, Sección de Conservación de Suelos. s.p.
- CNULD. 2009. Mecanismos de incentivos basados en el mercado para la promoción del manejo sostenible de la tierra. Marco y herramientas para la evaluación de su aplicabilidad. Documento de trabajo.:61 p.
- Cubero Fernández, D. 1994. Manual de manejo y conservación de suelos y aguas. San José; sn, 1994. 278 p.
- Chow, VT; Maidment, DR; Mays, LW. 1994. Hidrología aplicada. Santafé de Bogotá: McGraw-Hill. s.p.
- Dhruva Narayana, V. 1986. Soil and water conservation research in India. Indian Council of Agricultural Research, New Delhi, s. p.
- García, I; Dorronsoro, C. 2000. Contaminación del suelo. Dpto. de Edafología y Química Agrícola. Universidad de Granada s.p.
- González Hidalgo, JC. 1998. Los procesos de erosión del suelo: hechos, mitos y paradojas. Geographicalia (36):47-66.
- Gustafson, AF. 1957. Conservación del suelo. Continental.México, D.F., 329 p.
- Herweg, K. 1996. Manual de campo para la valoración del daño por erosión actual. Centro para el Desarrollo y el Medio Ambiente (CDMA), Universidad de Berna, Suiza y Programa para la Agricultura Sostenible en Laderas de América Central (PASOLAC). 39P.
- IARNA. 2006. Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente. Estado del uso de la tierra y ordenamiento territorial en Guatemala.p. 53-71.
- Klingebiel, A.A. and P.H. Montgomery. 1961. Land-Capability Classification. USDA-SCS

- Agric. Handb. 210. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- Loveland, P.J., Whalley, W.R. 1991. Particle size analysis. In: Smith, K.A. y Mullis, ChE. (Eds) Soil analysis: physical methods. New York. Marcel Dekker. p. 271-328.
- LUPE; USAID. 1998. Manual práctico de manejo de suelos en laderas. Honduras, Proyecto Mejoramiento del Uso y Productividad de la Tierra. 53p.
- Mancomunidad Copán Chortí, Plan de manejo de la microcuenca Torjá, Chiquimula, Guatemala 2011 75p.
- Mataix Solera, J. 1999. Alteraciones físicas, químicas y biológicas en suelos afectados por incendios forestales: contribución a su conservación y regeneración. s.p.
- Modelling, H. Modelling Erosion in Alternative Land-Use Scenarios Under Current and Future Climate Change: Inputs for Soil Conservation Management Programs in the Birrís Watershed, Costa Rica. Modelling Agroforestry Systems:289.
- Morgan, RPC. 1997. Erosión y conservación del suelo. Mundi-Prensa Libros. p.
- Norman, D; Douglas, M. 1996. Desarrollo de sistemas agrícolas y conservación del suelo. Food & Agriculture Org. p. (7)
- Olsen S.R., Sommers L.E.1982. Phosphorus. In: Page AL, et al (eds), Methods of Soil Analysis, Part 2, 2nd edn, Agron Monogr 9. ASA and ASSA, Madison WI, pp 403-430
- Richards, L. A. 1965. Physical condition of water in soil. In Black, C.A.,ed. Methods of soil analysis. pp. 128-137. Madison, Wisconsin, Am.Soc.Agron.
- Robert, M. 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Food & Agriculture Org. p. (96)
- Simmons, CS; Nacional, IA; Guatemala, SCI-adA. 1959. Clasificación de reconocimiento de los suelos de la República de Guatemala. Editorial del Ministerio de Educación Pública," José de Pineda Ibarra". 205p.
- Vahrson, W; Cervantes, C. 1991. Tasas de esorrentía superficial y erosión laminar en Puriscal, Costa Rica. Turrialba 41:396-396.
- Vargas Cabezas, F. 2010. Estimación de pérdida de carbono en el suelo por erosión hídrica laminar bajo diferentes escenarios de producción hortícola y ganadera en la subcuenca del río Birrís, Costa Rica. Tesis MSc. Turrialba, CR, CATIE. 136 p.

## ANEXOS

Anexo 1. Cuadro de análisis de correlación de Spearman con variables biofísicas e indicadores de erosión en cultivos de maíz de secano

		Erosión laminar (%)	Erosión surcos (%)	Erosión total (%)	Suelo perdido (m3/ha)	No erosión (%)	Otros (%)	Pendiente (%)	Pendiente_cod	CS_r (%)	CS_rv (%)	CS_s (%)	Arena (%)	Limo G (%)	Limo f (%)	Arcilla (%)	pH	CaCO3 eq (%)	P	N Total	CO	Hum 1/3atm	Hum 15atm	Agua útil	K	Na	Ca	Mg	S	CIC	V	
Erosión laminar (%)	Coefficiente de correlación	1,000	-,338	,413	-,459	-,369	,188	,732*	,706*	,049	,248	-,030	-,535	,438	,340	,182	-,043	-,085	,134	,109	,024	,547	,644*	,255	,426	,166	,195	,413	,243	,061	,243	
	Sig. (bilateral)		,340	,235	,182	,295	,604	,016	,023	,894	,489	,934	,111	,206	,336	,614	,906	,815	,713	,763	,947	,102	,044	,476	,220	,646	,590	,235	,498	,868	,498	
	N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Erosión surcos (%)	Coefficiente de correlación	-,338	1,000	,577	,901**	-,627	-,181	-,157	,043	,229	-,944**	,763*	-,345	-,263	,427	,320	,658*	,596	-,433	,314	,395	-,401	-,389	-,251	-,477	,114	,019	-,646*	-,182	-,427	,251	
	Sig. (bilateral)	,340		,081	,000	,052	,617	,664	,907	,525	,000	,010	,329	,462	,219	,368	,038	,069	,212	,378	,258	,250	,267	,484	,164	,753	,959	,044	,615	,219	,484	
	N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Erosión total (%)	Coefficiente de correlación	,413	,577	1,000	,292	-,772**	-,270	,324	,430	,040	-,529	,608	-,466	,241	,515	,101	,246	,338	,064	,052	,070	,076	-,021	,015	-,064	,056	-,125	-,162	-,186	-,448	,259	
	Sig. (bilateral)	,235	,081		,413	,009	,451	,361	,214	,913	,116	,062	,174	,503	,127	,782	,493	,339	,861	,887	,847	,834	,953	,967	,861	,879	,731	,656	,607	,194	,470	
	N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Suelo perdido (m3/ha)	Coefficiente de correlación	-,459	,901**	,292	1,000	-,572	,107	-,156	,027	,214	-,899**	,575	-,298	-,558	,195	,571	,713*	,454	-,623	,363	,480	-,441	-,272	-,376	-,454	,151	,259	-,739*	-,065	-,117	,000	
	Sig. (bilateral)	,182	,000	,413		,084	,769	,667	,941	,553	,000	,082	,403	,094	,590	,085	,021	,188	,055	,302	,160	,202	,446	,284	,188	,677	,469	,015	,859	,748	1,000	
	N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
No erosión (%)	Coefficiente de correlación	-,369	-,627	-,772**	-,572	1,000	-,314	-,390	-,570	-,344	,679*	-,498	,545	,208	-,298	-,571	-,478	-,363	,298	-,272	-,311	-,143	-,337	,104	-,052	-,085	-,311	,246	-,104	-,013	-,065	
	Sig. (bilateral)	,295	,052	,009	,084		,378	,265	,086	,331	,031	,143	,103	,565	,403	,085	,163	,302	,403	,446	,381	,694	,341	,775	,887	,815	,381	,493	,775	,972	,859	
	N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Otros (%)	Coefficiente de correlación	,188	-,181	-,270	,107	-,314	1,000	,271	,295	,549	-,025	-,419	-,113	-,590	-,408	,602	,190	,019	-,427	,420	,414	,514	,809**	,169	,458	,146	,608	,238	,483	,734*	-,395	
	Sig. (bilateral)	,604	,617	,451	,769	,378		,450	,408	,100	,945	,228	,756	,073	,242	,065	,599	,959	,219	,227	,234	,128	,005	,640	,183	,687	,062	,507	,157	,016	,258	
	N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Pendiente (%)	Coefficiente de correlación	,732*	-,157	,324	-,156	-,390	,271	1,000	,959**	,196	,055	-,226	-,578	,291	,193	,346	,228	,052	,070	,229	,101	,394	,437	,291	,492	-,065	,413	,364	,431	,254	,101	
	Sig. (bilateral)	,016	,664	,361	,667	,265	,450		,000	,588	,880	,531	,080	,415	,594	,328	,526	,887	,847	,524	,781	,259	,206	,415	,148	,858	,236	,301	,213	,479	,781	
	N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Pendiente_cod	Coefficiente de correlación	,706*	,043	,430	,027	-,570	,295	,959**	1,000	,332	-,114	-,064	-,631	,255	,255	,414	,341	,166	-,032	,281	,147	,306	,414	,236	,453	-,077	,459	,274	,465	,249	,210	
	Sig. (bilateral)	,023	,907	,214	,941	,086	,408	,000		,349	,753	,862	,050	,477	,477	,234	,335	,647	,930	,432	,686	,390	,234	,512	,189	,832	,182	,443	,175	,488	,560	
	N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
CS_r (%)	Coefficiente de correlación	,049	,229	,040	,214	-,344	,549	,196	,332	1,000	-,261	-,188	-,085	-,189	-,134	,122	,302	,598	-,329	,567	,421	,415	,372	,598	,500	,028	,244	,427	,433	,280	,171	
	Sig. (bilateral)	,894	,525	,913	,553	,331	,100	,588	,349		,466	,602	,815	,601	,712	,737	,397	,068	,353	,087	,226	,233	,290	,068	,141	,939	,497	,219	,211	,432	,637	
	N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

CS_rv (%)	Coefficiente de correlación Sig. (bilateral) N	,248 ,489 10	-,944** ,000 10	-,529 ,116 10	-,899** ,000 10	,679* ,031 10	-,025 ,945 10	,055 ,880 10	-,114 ,753 10	-,261 ,466 10	1,000 , 10	-,733* ,016 10	,505 ,137 10	,371 ,291 10	-,480 ,160 10	-,529 ,116 10	- ,791** 10	-,578 ,080 10	,517 ,126 10	-,468 ,172 10	-,565 ,089 10	,261 ,466 10	,176 ,626 10	,286 ,424 10	,492 ,148 10	-,178 ,622 10	-,201 ,578 10	,638* ,047 10	,067 ,854 10	,347 ,327 10	-,201 ,578 10
CS_s (%)	Coefficiente de correlación Sig. (bilateral) N	-,030 ,934 10	,763* ,010 10	,608 ,062 10	,575 ,082 10	-,498 ,143 10	-,419 ,228 10	-,226 ,531 10	-,064 ,862 10	-,188 ,602 10	-,733* ,016 10	1,000 , 10	-,505 ,137 10	,067 ,854 10	,772** ,009 10	,261 ,466 10	,522 ,122 10	,274 ,444 10	-,261 ,466 10	,140 ,700 10	,249 ,487 10	-,468 ,172 10	-,334 ,345 10	-,529 ,116 10	-,736* ,015 10	,203 ,574 10	-,043 ,907 10	-,711* ,021 10	-,261 ,466 10	- ,638* 10	,505 ,137 10
Arena (%)	Coefficiente de correlación Sig. (bilateral) N	-,535 ,111 10	-,345 ,329 10	-,466 ,174 10	-,298 ,403 10	,545 ,103 10	-,113 ,756 10	-,578 ,080 10	-,631 ,050 10	-,085 ,815 10	,505 ,137 10	-,505 ,137 10	1,000 , 10	-,159 ,662 10	- ,805** 10	-,695* ,026 10	- ,794** 10	-,195 ,589 10	,439 ,204 10	-,646* ,043 10	-,622 ,055 10	,000 1,000 10	-,232 ,519 10	,159 ,662 10	,280 ,432 10	-,370 ,292 10	-,561 ,092 10	,244 ,497 10	-,354 ,316 10	,183 ,613 10	-,524 ,120 10
Limo G (%)	Coefficiente de correlación Sig. (bilateral) N	,438 ,206 10	-,263 ,462 10	,241 ,503 10	-,558 ,094 10	,208 ,565 10	-,590 ,073 10	,291 ,415 10	,255 ,477 10	-,189 ,601 10	,371 ,291 10	-,067 ,854 10	-,159 ,662 10	1,000 , 10	,439 ,204 10	-,500 ,141 10	-,203 ,574 10	-,280 ,432 10	,610 ,061 10	-,232 ,519 10	-,439 ,204 10	-,146 ,687 10	-,268 ,454 10	,085 ,815 10	,012 ,973 10	-,358 ,310 10	-,110 ,763 10	,439 ,204 10	,244 ,497 10	-,220 ,542 10	,683* ,030 10
Limo f (%)	Coefficiente de correlación Sig. (bilateral) N	,340 ,336 10	,427 ,219 10	,515 ,127 10	,195 ,590 10	-,298 ,403 10	-,408 ,242 10	,193 ,594 10	,255 ,477 10	-,134 ,712 10	-,480 ,160 10	,772** ,009 10	- ,805** 10	,439 ,204 10	1,000 , 10	,256 ,475 10	,609 ,062 10	,220 ,542 10	-,183 ,613 10	,390 ,265 10	,378 ,281 10	-,244 ,497 10	-,171 ,637 10	-,256 ,475 10	-,573 ,083 10	,272 ,448 10	,134 ,712 10	-,341 ,334 10	,049 ,894 10	-,622 ,055 10	,780** ,008 10
Arcilla (%)	Coefficiente de correlación Sig. (bilateral) N	,182 ,614 10	,320 ,368 10	,101 ,782 10	,571 ,085 10	-,571 ,085 10	,602 ,065 10	,346 ,328 10	,414 ,234 10	,122 ,737 10	-,529 ,116 10	,261 ,466 10	-,695* ,026 10	-,500 ,141 10	,256 ,475 10	1,000 , 10	,745* ,013 10	,049 ,894 10	-,707* ,022 10	,585 ,075 10	,671* ,034 10	-,024 ,947 10	,415 ,233 10	-,366 ,298 10	-,220 ,542 10	,377 ,283 10	,768** ,009 10	-,451 ,191 10	,354 ,316 10	,293 ,412 10	-,061 ,867 10
pH	Coefficiente de correlación Sig. (bilateral) N	-,043 ,906 10	,658* ,038 10	,246 ,493 10	,713* ,021 10	-,478 ,163 10	,190 ,599 10	,228 ,526 10	,341 ,335 10	,302 ,397 10	- ,791** 10	,522 ,122 10	- ,794** 10	-,203 ,574 10	,609 ,062 10	,745* ,013 10	1,000 , 10	,388 ,268 10	-,695* ,026 10	,794** ,006 10	,794** ,006 10	-,265 ,460 10	-,043 ,906 10	-,228 ,527 10	-,462 ,179 10	,324 ,361 10	,609 ,062 10	-,462 ,179 10	,363 ,302 10	-,117 ,748 10	,425 ,221 10
CaCO3 eq (%)	Coefficiente de correlación Sig. (bilateral) N	-,085 ,815 10	,596 ,069 10	,338 ,339 10	,454 ,188 10	-,363 ,302 10	,019 ,959 10	,052 ,887 10	,166 ,647 10	,598 ,068 10	-,578 ,080 10	,274 ,444 10	-,195 ,589 10	-,280 ,432 10	,220 ,542 10	,049 ,894 10	,388 ,268 10	1,000 , 10	-,415 ,233 10	,463 ,177 10	,500 ,141 10	,293 ,412 10	,012 ,973 10	,500 ,141 10	,134 ,712 10	,358 ,310 10	-,305 ,392 10	-,134 ,712 10	-,317 ,372 10	-,488 ,153 10	,134 ,712 10
P	Coefficiente de correlación Sig. (bilateral) N	,134 ,713 10	-,433 ,212 10	,064 ,861 10	-,623 ,055 10	,298 ,403 10	-,427 ,219 10	,070 ,847 10	-,032 ,930 10	-,329 ,353 10	,517 ,126 10	-,261 ,466 10	,439 ,204 10	,610 ,061 10	-,183 ,613 10	-,707* ,022 10	-,695* ,026 10	-,415 ,233 10	1,000 , 10	- ,780** 10	- ,878** 10	,049 ,894 10	-,171 ,637 10	,012 ,973 10	,232 ,519 10	- ,759* 10	-,402 ,249 10	,476 ,165 10	-,073 ,841 10	,000 1,000 10	-,037 ,920 10
N Total	Coefficiente de correlación Sig. (bilateral) N	,109 ,763 10	,314 ,378 10	,052 ,887 10	,363 ,302 10	-,272 ,446 10	,420 ,227 10	,229 ,524 10	,281 ,432 10	,567 ,087 10	-,468 ,172 10	,140 ,700 10	-,646* ,043 10	-,232 ,519 10	,390 ,265 10	,585 ,075 10	,794** ,006 10	,463 ,177 10	- ,780** 10	1,000 , 10	,951** ,000 10	,183 ,613 10	,268 ,454 10	,280 ,432 10	-,085 ,815 10	,605 ,064 10	,524 ,920 10	-,037 ,233 10	,415 ,973 10	-,012 ,334 10	,341 10

CO	Coefficiente de correlación Sig. (bilateral) N	,024 ,947 10	,395 ,258 10	,070 ,847 10	,480 ,160 10	-,311 ,381 10	,414 ,234 10	,101 ,781 10	,147 ,686 10	,421 ,226 10	-,565 ,089 10	,249 ,487 10	-,622 ,055 10	-,439 ,204 10	,378 ,281 10	,671* ,034 10	,794** ,006 10	,500 ,141 10	-,878** ,001 10	,951** ,000 10	1,000 , 10	,171 ,637 10	,268 ,454 10	,159 ,662 10	-,207 ,565 10	,741* ,014 10	,427 ,219 10	-,268 ,454 10	,183 ,613 10	-,122 ,737 10	,171 ,637 10
Hum 1/3atm	Coefficiente de correlación Sig. (bilateral) N	,547 ,102 10	-,401 ,250 10	,076 ,834 10	-,441 ,202 10	-,143 ,694 10	,514 ,128 10	,394 ,259 10	,306 ,390 10	,415 ,233 10	,261 ,466 10	-,468 ,172 10	,000 1,000 10	-,146 ,687 10	-,244 ,497 10	-,024 ,947 10	-,265 ,460 10	,293 ,412 10	,049 ,894 10	,183 ,613 10	,171 ,637 10	1,000 , 10	,805** ,005 10	,720* ,019 10	,744* ,014 10	,253 ,480 10	-,134 ,712 10	,598 ,068 10	-,037 ,920 10	,122 ,737 10	-,329 ,353 10
Hum 15atm	Coefficiente de correlación Sig. (bilateral) N	,644* ,044 10	-,389 ,267 10	-,021 ,953 10	-,272 ,446 10	-,337 ,341 10	,809** ,005 10	,437 ,206 10	,414 ,234 10	,372 ,290 10	,176 ,626 10	-,334 ,345 10	-,232 ,519 10	-,268 ,454 10	-,171 ,637 10	,415 ,233 10	-,043 ,906 10	,012 ,973 10	-,171 ,637 10	,268 ,454 10	,268 ,454 10	,805** ,005 10	1,000 , 10	,305 ,392 10	,573 ,083 10	,247 ,492 10	,341 ,334 10	,402 ,249 10	,280 ,432 10	,451 ,191 10	-,268 ,454 10
Agua útil	Coefficiente de correlación Sig. (bilateral) N	,255 ,476 10	-,251 ,484 10	,015 ,967 10	-,376 ,284 10	,104 ,775 10	,169 ,640 10	,291 ,415 10	,236 ,512 10	,598 ,068 10	,286 ,424 10	-,529 ,116 10	,159 ,662 10	,085 ,815 10	-,256 ,475 10	-,366 ,298 10	-,228 ,527 10	,500 ,141 10	,012 ,973 10	,280 ,432 10	,159 ,662 10	,720* ,305 10	1,000 , 10	,756* ,011 10	,228 ,526 10	-,305 ,392 10	,695* ,026 10	-,012 ,973 10	-,024 ,947 10	-,049 ,894 10	
K	Coefficiente de correlación Sig. (bilateral) N	,426 ,220 10	-,477 ,164 10	-,064 ,861 10	-,454 ,188 10	-,052 ,887 10	,458 ,183 10	,492 ,148 10	,453 ,189 10	,500 ,141 10	,492 ,148 10	-,736* ,015 10	,280 ,432 10	,012 ,973 10	-,573 ,083 10	-,220 ,542 10	-,462 ,179 10	,134 ,712 10	,232 ,519 10	-,085 ,815 10	-,207 ,565 10	,744* ,014 10	,573 ,083 10	,756* ,011 10	1,000 , 10	-,130 ,721 10	-,085 ,815 10	,768** ,009 10	,159 ,662 10	,463 ,177 10	-,341 ,334 10
Na	Coefficiente de correlación Sig. (bilateral) N	,166 ,646 10	,114 ,753 10	,056 ,879 10	,151 ,677 10	-,085 ,815 10	,146 ,687 10	-,065 ,858 10	-,077 ,832 10	,028 ,939 10	-,178 ,622 10	,203 ,574 10	-,370 ,292 10	-,358 ,310 10	,272 ,448 10	,377 ,283 10	,324 ,361 10	,358 ,310 10	-,759* ,011 10	,605 ,064 10	,741* ,014 10	,253 ,480 10	,247 ,492 10	,228 ,526 10	-,130 ,721 10	1,000 , 10	-,025 ,946 10	-,302 ,396 10	-,290 ,416 10	-,346 ,328 10	,000 1,000 10
Ca	Coefficiente de correlación Sig. (bilateral) N	,195 ,590 10	,019 ,959 10	-,125 ,731 10	,259 ,469 10	-,311 ,381 10	,608 ,062 10	,413 ,236 10	,459 ,182 10	,244 ,497 10	-,201 ,578 10	-,043 ,907 10	-,561 ,092 10	-,110 ,763 10	,134 ,712 10	,768** ,009 10	,609 ,062 10	-,305 ,392 10	-,402 ,249 10	,524 ,120 10	,427 ,219 10	-,134 ,712 10	,341 ,334 10	-,305 ,392 10	-,085 ,815 10	-,025 ,946 10	1,000 , 10	,000 ,002 10	,854** ,043 10	,646* ,637 10	,171 10
Mg	Coefficiente de correlación Sig. (bilateral) N	,413 ,235 10	-,646* ,044 10	-,162 ,656 10	-,739* ,015 10	,246 ,493 10	,238 ,507 10	,364 ,301 10	,274 ,443 10	,427 ,219 10	,638* ,047 10	-,711* ,021 10	,244 ,497 10	,439 ,204 10	-,341 ,334 10	-,451 ,191 10	-,462 ,179 10	-,134 ,712 10	,476 ,165 10	-,037 ,920 10	-,268 ,454 10	,598 ,068 10	,402 ,249 10	,695* ,026 10	,768** ,009 10	-,302 ,396 10	1,000 , 10	,439 ,204 10	,402 ,249 10	,049 ,894 10	
S	Coefficiente de correlación Sig. (bilateral) N	,243 ,498 10	-,182 ,615 10	-,186 ,607 10	-,065 ,859 10	-,104 ,775 10	,483 ,157 10	,431 ,213 10	,465 ,175 10	,433 ,211 10	,067 ,854 10	-,261 ,466 10	-,354 ,316 10	,244 ,497 10	,049 ,894 10	,354 ,316 10	,363 ,302 10	-,317 ,372 10	-,073 ,841 10	,415 ,233 10	,183 ,613 10	-,037 ,920 10	,280 ,432 10	-,012 ,973 10	,159 ,662 10	-,290 ,416 10	,854** ,002 10	,439 ,204 10	1,000 , 10	,683* ,030 10	,366 ,298 10
CIC	Coefficiente de correlación Sig. (bilateral) N	,061 ,868 10	-,427 ,219 10	-,448 ,194 10	-,117 ,748 10	-,013 ,972 10	,734* ,016 10	,254 ,479 10	,249 ,488 10	,280 ,432 10	,347 ,327 10	-,638* ,047 10	,183 ,613 10	-,220 ,542 10	-,622 ,055 10	,293 ,412 10	-,117 ,748 10	-,488 ,153 10	,000 1,000 10	-,012 ,973 10	-,122 ,737 10	,122 ,737 10	,451 ,191 10	-,024 ,947 10	,463 ,177 10	-,346 ,328 10	,646* ,043 10	,402 ,249 10	,683* ,030 10	1,000 , 10	-,354 ,316 10

V	Coefficiente de correlación Sig. (bilateral)	,243	,251	,259	,000	-,065	-,395	,101	,210	,171	-,201	,505	-,524	,683*	,780**	-,061	,425	,134	-,037	,341	,171	-,329	-,268	-,049	-,341	,000	,171	,049	,366	-,354	1,000		
	N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Anexo 2. Análisis de aleatoriedad (prueba de rachas)

	Pendiente (%)	Pendiente_cod	Erosión laminar (%)	Erosión surcos (%)	Erosión total (%)	Suelo perdido (m3/ha)	No erosión (%)	Otros (%)	CS_r (%)	CS_rv (%)	CS_s (%)	Arena (%)	Limo G (%)	Limo f (%)
<b>Valor de prueba<sup>a</sup></b>	41	4	77,78	5,79	90,74	0,17	2,33	1,40	11,88	37,50	47,50	35,77	6,18	24,27
<b>Casos &lt; Valor de prueba</b>	4	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4
<b>Casos &gt;= Valor de prueba</b>	6	7	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6
<b>Casos en total</b>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<b>Número de rachas</b>	5	4	6	3	6	7	7	6	6	3	7	2	5	5
<b>Z</b>	-0,21	-0,57	0	-1,68	0	0,34	0,34	0,00	0,00	-1,68	0,34	-2,35	-0,34	-0,21
<b>Sig. asintót. (bilateral)</b>	0,83	0,57	1	0,09	1,00	0,74	0,74	1,00	1,00	0,09	0,74	0,02	0,74	0,83
<b>Sig. exacta (bilateral)</b>	0,714	0,45	1	0,08	1,00	0,71	0,71	1,00	1,00	0,08	0,71	0,02	0,71	0,71
<b>Probabilidad en el punto</b>	0,21	0,20	0,29	0,03	0,29	0,19	0,19	0,29	0,29	0,03	0,19	0,01	0,19	0,21

a. mediana

	Arcilla (%)	pH	CaCO3 eq (%)	P	N Total	CO	Hum 1/3atm	Hum 15atm	Agua útil	K	Na	Ca	Mg	S	CIC	V
<b>Valor de prueba<sup>a</sup></b>	32,49	5,82	0,31	21,29	0,13	1,94	25,16	18,33	6,17	0,43	0,08	12,20	1,94	17,48	36,52	51,93
<b>Casos &lt; Valor de prueba</b>	5	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
<b>Casos &gt;= Valor de prueba</b>	5	7	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
<b>Casos en total</b>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
<b>Número de rachas</b>	6	3	4	6	2	6	7	6	7	5	6	6	7	6	6	6
<b>Z</b>	0	-1,39	-1,01	0	-2,35	0	0,34	0	0,34	-0,34	0	0	0,34	0	0	0
<b>Sig. asintót. (bilateral)</b>	1	0,16	0,31	1	0,02	1	0,74	1	0,74	0,74	1	1	0,74	1	1	1
<b>Sig. exacta (bilateral)</b>	1	0,08	0,33	1	0,02	1	0,71	1	0,71	0,71	1	1	0,71	1	1	1
<b>Probabilidad en el punto</b>	0,29	0,07	0,13	0,29	0,01	0,29	0,19	0,29	0,19	0,19	0,29	0,29	0,19	0,29	0,29	0,29

Anexo 3. Análisis de regresión de la erosión en surcos

Resumen del modelo<sup>b</sup>

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Estadísticos de cambio					Durbin-Watson
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. Cambio en F	
1	0,817 <sup>a</sup>	0,667	0,625	6,81572	0,667	16,025	1	8	0,004	1,180

a, Variables predictoras: (Constante), CS\_rv (%)

b, Variable dependiente: Erosión surcos (%)

Coefficientes<sup>a</sup>

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.	Intervalo de confianza de 95,0% para B		Correlaciones			Estadísticos de colinealidad	
		B	Error típ.	Beta			Límite inferior	Límite superior	Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia	FIV
1	(Constante)	29,635	5,671		5,226	0,001	16,557	42,712					
	CS_rv (%)	-0,562	0,140	-0,817	-4,003	0,004	-0,886	-0,238	-0,817	-0,817	-0,817	1,000	1,000

a. Variable dependiente: Erosión surcos (%)

Anexo 4. Análisis de regresión de volumen de suelo perdido

Resumen del modelo<sup>b</sup>

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Estadísticos de cambio					Durbin-Watson
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. Cambio en F	
1	0,813 <sup>a</sup>	0,660	0,618	3,61255	0,660	15,542	1	8	0,004	2,815

a, Variables predictoras: (Constante), CS\_rv (%)

b, Variable dependiente: suelo perdido (m3/ha)

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.	Intervalo de confianza de 95% para B		Correlaciones			Estadísticos de colinealidad	
		B	Error típ.	Beta			Límite inferior	Límite superior	Orden cero	Parcial	Semiparcial	Tolerancia	FIV
1	(Constante)	14,876	3,006		4,949	0,001	7,945	21,808					
	CS_rv (%)	-0,294	0,074	-0,813	-3,942	0,004	-0,465	-0,122	-0,813	-0,813	-0,813	1,000	1,000

a, Variable dependiente: suelo perdido (m3/ha)

Anexo 5. Resultados del análisis de laboratorio de muestras de suelos en plantaciones de café

Muestra	pH	Acidez	Ca	Mg	K	P	C,O,	ARENA	LIMO	ARCILLA	TEXTURA
	H <sub>2</sub> O	-----cmol(+)/kg----- -----				mg/kg	%	----- % ----- -----			
1	6,32	0,05	15,83	2,14	0,70	12,5	6,67	39,3	34,5	26,2	Franco
2							3,39	39,3	29,5	31,2	Franco arcilloso
3	5,22	1,99	9,97	2,68	0,70	6,7	1,45	34,3	24,5	41,2	Arcilloso
4	5,14	2,57	9,95	2,71	0,62	4,7	1,49	34,3	24,5	41,2	Arcilloso
5							1,37	54,3	24,4	21,3	Franco
6	5,03	0,86	4,58	0,72	0,25	29,8	2,26	47,1	27,0	25,9	Franco arcillo arenoso
7	5,67	0,15	10,41	3,37	0,51	16,7	1,48	39,3	44,4	16,3	Franco
8							0,82	39,3	39,3	21,4	Franco
9	5,76	0,25	16,17	6,33	0,38	9,1	2,57	26,8	44,3	28,9	Franco arcilloso
10							1,40	21,8	46,8	31,4	Franco arcilloso
11	5,22	0,65	12,00	3,83	1,64	5,0	2,97	39,7	27,3	33,0	Franco arcilloso
12							2,03	34,7	22,3	43,0	Arcilloso
13	6,11	0,05	8,62	4,32	0,94	2,6	2,26	19,7	34,7	45,6	Arcilloso
14							1,84	17,2	32,2	50,6	Arcilloso
15	6,07	0,05	9,30	1,90	0,61	8,1	3,36	52,2	22,1	25,7	Franco arcillo arenoso
16							0,97	39,7	22,1	38,2	Franco arcilloso
17	6,41	0,05	8,86	2,14	2,34	5,5	2,38	52,1	24,4	23,5	Franco arcillo arenoso
18							1,14	52,2	24,6	23,2	Franco arcillo arenoso
19	6,28	0,05	19,04	6,34	1,10	22,5	2,92	19,6	44,7	35,7	Franco arcillo limoso
20							0,57	29,6	37,1	33,3	Franco arcilloso
21	6,11	0,16	18,05	16,31	0,51	12,5	1,08	39,7	37,1	23,2	Franco
22							0,28	37,2	34,6	28,2	Franco arcilloso
23	5,91	0,05	12,26	6,54	0,71	25,5	1,99	24,7	39,6	35,7	Franco arcilloso
24							0,58	14,7	21,9	63,4	Arcilloso
25	5,35	0,12	7,18	4,11	1,70	6,1	3,49	59,7	21,9	18,4	Franco arenoso
26							1,99	49,7	29,5	20,8	Franco
27	5,70	0,08	3,83	1,05	0,63	4,8	2,12	49,7	29,5	20,8	Franco
28							1,94	54,6	27,0	18,4	Franco arenoso

Anexo 6. Resultados del análisis de laboratorio de muestras de suelo en plantaciones de maíz

Código laboratorio	Arena (%)	Limo G (%)	Limo f (%)	Arcilla (%)	pH	CaCO3 eq (%)	P (ppm)	N Total (%)	CO (%)	Hum 1/3atm (%)	Hum 15atm (%)	Agua útil (%)	K cmol+kg-1	Na cmol+kg-1	Ca cmol+kg-1	Mg cmol+kg-1	CIC cmol+kg-1	V (%)
1	21.54	5.83	25.30	47.33	7.05	0.33	2.31	0.32	3.27	25.09	20.07	5.02	0.29	0.48	23.88	1.50	45.91	56.95
2	27.28	4.77	23.35	44.59	7.41	0.66	9.44	0.39	3.59	26.35	19.21	7.14	0.55	0.09	17.05	1.67	43.83	44.16
3A	21.08	7.24	29.66	42.02	6.42	0.10	17.32	0.24	3.24	25.22	19.45	5.77	0.28	0.70	19.03	2.21	40.00	55.53
3B	16.45	4.92	20.95	57.68	6.34	0.07	12.35	0.05	0.73	26.27	19.50	6.77	0.23	0.50	15.95	2.17	25.57	73.72
4A	31.67	10.37	28.10	29.86	5.96	0.16	17.99	0.16	2.08	22.92	15.56	7.36	0.65	0.85	11.30	1.29	25.04	56.28
4B	12.14	3.22	20.22	64.42	6.14	0.13	27.65	0.09	0.74	29.23	23.70	5.53	0.55	0.22	18.70	1.25	26.43	78.38
5	31.89	5.60	26.44	36.06	8.02	18.57	12.74	0.31	3.26	23.91	18.81	5.11	0.38	0.02	5.83	9.94	16.17	100.00
6A	40.73	5.83	24.27	29.17	5.82	0.30	25.26	0.11	1.47	17.63	13.40	4.23	0.22	0.07	8.35	0.45	18.78	48.34
6B	26.64	4.21	14.05	55.10	6.08	0.20	21.50	0.04	0.54	26.39	22.23	4.15	1.41	0.00	10.63	2.46	28.52	50.82
8A	49.50	9.66	17.05	23.79	5.51	0.23	62.45	0.12	1.10	22.99	16.58	6.42	1.09	0.04	15.73	9.58	46.96	56.31
8C	37.30	5.58	13.12	44.00	5.23	0.20	18.67	0.08	0.44	30.79	26.09	4.69	0.51	0.04	9.18	2.33	24.52	49.20
9	37.56	6.53	20.11	35.80	5.17	0.26	226.14	0.03	0.94	29.25	23.13	6.12	1.33	0.04	13.10	4.83	46.61	41.43
10	33.98	11.94	34.17	19.92	5.82	0.45	219.60	0.14	1.88	28.58	17.44	11.14	0.47	0.07	7.20	7.92	15.65	100.00
11A	22.05	9.60	33.30	35.05	6.05	0.41	45.96	0.23	2.46	31.77	22.71	9.06	0.18	0.20	14.08	10.58	42.78	58.51
11B	24.19	4.44	20.36	51.01	5.89	0.03	16.67	0.02	0.63	41.45	33.27	8.18	0.78	0.22	5.98	2.21	50.43	18.21
12A	19.08	5.66	26.64	48.63	5.27	0.38	31.83	0.41	4.96	33.64	30.39	3.25	0.23	0.54	3.83	1.25	23.65	24.73
12B	6.84	3.17	11.29	78.69	5.11	0.34	36.28	0.12	1.35	38.31	34.45	3.86	0.10	0.09	2.80	2.46	21.22	25.68
13A	52.23	5.00	16.86	25.91	4.37	0.34	16.67	0.12	2.01	45.17	19.69	25.48	1.15	0.89	1.45	4.21	33.04	23.31
13B	36.65	3.05	17.66	42.64	4.31	0.38	9.06	0.05	0.66	31.20	28.10	3.10	0.72	0.11	1.50	0.13	26.78	9.15
13C	32.68	3.78	25.47	38.07	4.48	0.34	9.58	0.06	0.35	29.04	26.40	2.64	0.55	0.00	13.60	1.04	24.52	61.94
14A	16.95	9.04	34.18	39.84	6.65	0.37	10.12	0.19	2.28	23.44	17.23	6.21	0.38	0.80	11.30	0.79	17.57	75.61
14B	15.05	8.61	28.02	48.32	6.06	0.41	19.36	0.11	0.83	22.76	18.17	4.59	0.40	0.98	11.20	0.80	20.52	65.16
15A	15.32	5.73	33.42	45.54	5.25	0.51	46.99	0.27	3.70	30.66	25.02	5.63	0.77	0.09	6.48	1.46	31.30	28.08
15B	10.53	2.70	18.20	68.58	5.48	0.72	30.13	0.08	0.88	33.46	29.37	4.09	0.18	0.00	3.85	1.08	20.35	25.13