

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA  
ÁREA INTEGRADA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**ESTUDIO DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA PARTE ALTA DE LA ZONA CAÑERA,  
MICROCUENCA LOS SUJUYES, DIAGNÓSTICO Y SERVICIOS EN EL INSTITUTO  
PRIVADO DE INVESTIGACIÓN SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO -ICC-, SANTA LUCÍA  
COTZUMALGUAPA, ESCUINTLA, GUATEMALA, C.A.**

ALMA LIZETH SANTOS PÉREZ

GUATEMALA, ABRIL 2014



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA  
ÁREA INTEGRADA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**ESTUDIO DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA PARTE ALTA DE LA ZONA CAÑERA,  
MICROCUENCA LOS SUJUYES, DIAGNÓSTICO Y SERVICIOS EN EL INSTITUTO  
PRIVADO DE INVESTIGACIÓN SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO -ICC-, SANTA LUCÍA  
COTZUMALGUAPA, ESCUINTLA, GUATEMALA, C.A.**

PRESENTADO A LA HONORABLE JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA DE  
LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

POR

ALMA LIZETH SANTOS PÉREZ

EN EL ACTO DE INVESTIDURA COMO  
INGENIERA AGRÓNOMA EN  
SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA  
EN EL GRADO ACADÉMICO DE

LICENCIADA

GUATEMALA, ABRIL 2014



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA

RECTOR MAGNÍFICO  
DR. Carlos Estuardo Gálvez Barrios

JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA

DECANO	Dr. Lauriano Figueroa Quiñonez
VOCAL PRIMERO	Dr. Ariel Abderramán Ortiz López
VOCAL SEGUNDO	Ing. Agr. MSc. Marino Barrientos García
VOCAL TERCERO	Ing. Agr. MSc. Oscar René Leiva Ruano
VOCAL CUARTO	P. For. Sindi Benita Simón Mendoza
VOCAL QUINTO	Br. Sergio Alexander Soto Estrada
SECRETARIO	Ing. Agr. Carlos Roberto Echeverría Escobedo

GUATEMALA, ABRIL 2014



Guatemala, abril de 2014

Honorable Junta Directiva  
Honorable Tribunal Examinador  
Facultad de Agronomía  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Honorables miembros,

De conformidad con las normas establecidas por la Ley Orgánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, tengo el honor de someter a vuestra consideración el Trabajo de Graduación **“ESTUDIO DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA PARTE ALTA DE LA ZONA CAÑERA, MICROCUENCA LOS SUJUYES, DIAGNÓSTICO Y SERVICIOS EN EL INSTITUTO PRIVADO DE INVESTIGACIÓN SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO -ICC-, SANTA LUCÍA COTZUMALGUAPA, ESCUINTLA, GUATEMALA, C.A”**, como requisito previo a optar al título de Ingeniera Agrónoma en Sistema de Producción Agrícola, en el grado académico de Licenciada.

Esperando que el mismo llene los requisitos necesarios para su aprobación, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Alma Lizeth Santos Pérez



## **TRABAJO DE GRADUACIÓN QUE DEDICO:**

A DIOS, "...a aquel que es poderoso para hacer todo mucho más abundantemente de lo que pedimos o entendemos, según el poder que obra en nosotros" (efesios 3:20).

A MI PATRIA, Guatemala, libre al viento tu hermosa bandera a vencer o a morir llamará, que tu pueblo con ánimo fiero antes muerto que esclavo será.

A MI MADRE, por su apoyo incondicional en mis decisiones y por ser el mejor ejemplo.

A MIS HERMANOS, Luis Javier y Juan Josué. "Mirad cuán bueno y cuán delicioso es habitar los hermanos juntos en armonía" (salmos 133:1)

A MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS: que mostraron y compartieron su alegría, paciencia, y apoyo. Especialmente a los miembros del gremio PG, que ahora son parte de mi leyenda personal



## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por permitirme culminar mi carrera profesional.

A mi madre y hermanos que siempre han cuidado de mí.

A mis asesores Ing. Agr. Luis Reyes, Dr. Marvin Salguero, Ing. Agr. Horacio Ramírez, por su confianza y apoyo en la realización de este documento.

A mis catedráticos, especialmente a: Dr. Dimitri Santos, Ing. Manuel Martínez, Inga. Thylma Chamorro, Ing. Edgar Franco, Dr. Ariel Ortíz, Lic. Mamerto Reyes e Ing. Marino Barrientos, por compartir sus conocimientos y amistad.

Al Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático, especialmente al equipo del programa de manejo Integrado de Cuencas: Ing. Luis Reyes (coordinador), Andres Nelson (técnico), Josué Mena (EPS de la Universidad Rafael Landívar), Carlos Tivo (trabajador de campo) y Alexis Masa (Técnico). A los especialistas en sistemas de información geográfica: Ing. Alfredo Suárez (coordinador), Lic. Sergio Gill (hidrólogo) y Dazónomo Gonzalo López (técnico), por apoyarme para finalizar mi formación académica como profesional.

Al ingenio Pantaleón principalmente al Ing. Rony Bran (Administrador de la zona el Baúl), a Ricardo García (encargado de finca), Ing. Fabricio Alvarado (del área de ingeniería agrícola) y trabajadores de campo.

Al laboratorio agronómico de CENGICAÑA, por darme un espacio en sus instalaciones y los insumos en laboratorio para analizar las muestras de agua y sedimentos.

Al programa de becas de SEGEPLAN por apoyarme económicamente durante mi formación académica en la Facultad de Agronomía.







## ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	PÁGINA
1 CAPÍTULO I. DIAGNÓSTICO DEL PROGRAMA DE MANEJO INTEGRADO DE CUENCAS, INSTITUTO PRIVADO DE INVESTIGACIÓN SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO, SANTA LUCÍA COTZUMALGUAPA, ESCUINTLA, GUATEMALA, C.A.....	1
1.1 PRESENTACIÓN.....	2
1.2 MARCO CONCEPTUAL.....	3
1.2.1 Ubicación.....	3
1.2.2 Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático.....	3
1.2.3 Programas del Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático.....	5
1.2.4 Equipo profesional ICC.....	7
1.3 OBJETIVOS.....	10
1.3.1 Objetivo general.....	10
1.3.2 Objetivos específicos.....	10
1.4 METODOLOGÍA.....	11
1.4.1 Principales área de trabajo del programa de MIC.....	11
1.4.2 Evaluación del impacto generado por el programa de MIC en su área de influencia.....	11
1.4.3 Definir y priorizar la problemática del programa de MIC.....	11
1.5 RESULTADOS.....	14
1.5.1 Principales área de trabajo del programa de MIC.....	14
1.5.2 Evaluación del impacto generado por el programa de MIC en su área de influencia.....	15
1.5.3 Definir y priorizar la problemática del programa de MIC.....	20
1.6 CONCLUSIONES.....	22
1.7 RECOMENDACIONES.....	23
1.8 BIBLIOGRAFÍA.....	24
2 CAPÍTULO II. ESTUDIO DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA PARTE ALTA DE LA ZONA CAÑERA, MICROCUENCA LOS SUJUYES, SANTA LUCÍA COTZUMALGUAPA, ESCUINTLA, GUATEMALA, C.A.....	25
2.1 PRESENTACIÓN.....	26
2.2 MARCO CONCEPTUAL.....	28
2.2.1 Degradación de los suelos.....	28
2.2.2 Deterioro de las tierras en Guatemala.....	30
2.2.3 Erosión del suelo.....	32
2.2.4 Erosión de suelos y el cambio climático.....	44
2.2.5 Métodos de estimación de la erosión hídrica.....	45
2.3 MARCO REFERENCIAL.....	73
2.3.1 Ubicación geográfica.....	73

CONTENIDO	PÁGINA
2.3.2 Clima .....	73
2.3.3 El Relieve .....	75
2.3.4 Zonas de vida.....	75
2.3.5 Suelos.....	75
2.3.6 Recurso hídrico .....	75
2.3.7 Vegetación .....	76
2.4 OBJETIVOS.....	78
2.4.1 Objetivo general.....	78
2.4.2 Objetivos específicos .....	78
2.5 METODOLOGÍA.....	79
2.5.1 Estimación de la pérdida del suelo por erosión hídrica .....	79
2.5.2 Evaluación de los factores edafoclimáticos en la pérdida de suelo .....	92
2.5.3 Identificación de zonas vulnerables a la erosión hídrica .....	93
2.6 RESULTADOS .....	94
2.6.1 Estimación de la pérdida del suelo por erosión hídrica .....	94
2.6.2 Evaluación de los factores edafoclimáticos en la pérdida de suelo .....	111
2.6.3 Identificación de zonas vulnerables a la erosión hídrica .....	118
2.7 CONCLUSIONES.....	122
2.8 RECOMENDACIONES .....	123
2.9 BIBLIOGRAFÍA.....	124
3 CAPÍTULO III. INFORME DE SERVICIOS PRESTADOS AL PROGRAMA DE MANEJO INTEGRADO DE CUENCAS DEL INSTITUTO PRIVADO DE INVESTIGACIÓN SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO, SANTA LUCÍA COTZUMALGUAPA, ESCUINTLA, GUATEMALA, C.A. ....	129
3.1 SERVICIO 1: EVALUACIÓN DE CINCO TRATAMIENTOS GERMINATIVOS PARA SEMILLAS BOTÁNICAS DE MANGLE BOTONCILLO (CONOCARPUS ERECTUS), PROVENIENTES DE TAHUEXCO SUCHITEPÉQUEZ. ....	130
3.1.1 Introducción.....	130
3.1.2 Marco teórico.....	131
3.1.3 Bosque de mangle en Guatemala.....	138
3.1.4 Objetivos .....	140
3.1.5 Metodología.....	141
3.1.6 Resultados .....	146
3.1.7 Conclusiones.....	150
3.1.8 Recomendaciones .....	150
3.1.9 Bibliografía.....	151
3.2 SERVICIO 2: ESTABLECER INFORMACIÓN BASE PARA GENERAR UNA BASE DE DATOS SOBRE USOS Y USUARIOS DEL AGUA DEL RÍO CRISTÓBAL.....	153
3.2.1 Introducción.....	153

CONTENIDO	PÁGINA
3.2.2 Marco teórico.....	154
3.2.3 Objetivos.....	162
3.2.4 Metodología.....	163
3.2.5 Resultados.....	164
3.2.6 Conclusiones.....	173
3.2.7 Recomendaciones.....	173
3.2.8 Bibliografía.....	174
3.3 APÉNDICES .....	175

### ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Porcentajes de cumplimiento de las principales actividades.....	12
Cuadro 2. Proyectos y acciones desarrolladas y generadas en el 2012.....	15
Cuadro 3: Porcentajes de cumplimiento de actividades según área de trabajo .....	20
Cuadro 4: Superficie de las categorías de intensidad de uso de la tierras en Guatemala .....	31
Cuadro 5: Erosión potencial por actividades desarrolladas en tierras sobreutilizadas .....	32
Cuadro 6: Clasificación de los modelos de erosión del suelo.....	53
Cuadro 7: Dimensiones de los factores componentes de la EUPS.....	57
Cuadro 8: Código de estructura para definir el valor de K.....	59
Cuadro 9: Códigos de permeabilidad del suelo para definir el valor K.....	59
Cuadro 10: Valores del coeficiente de escorrentía C.....	65
Cuadro 11: Tipos de condición hidrológica. ....	67
Cuadro 12: Clasificación hidrológica de los suelos. ....	67
Cuadro 13: Condición de humedad antecedente (CHA).....	69
Cuadro 14: Número de curva N para complejos hidrológicos de suelos.....	70
Cuadro 15: Tabla de conversión para el número de curva (CN) .....	72
Cuadro 16: Coordenadas de ubicación, microcuenca Los Sujuyes .....	73
Cuadro 17: Caracterización climática en la zona cañera.....	73
Cuadro 18: Cobertura vegetal y área .....	76
Cuadro 19: Caracterización de parcelas de escurrimiento .....	94
Cuadro 20: Cantidad de suelo erosionado mensualmente, microcuenca Los Sujuyes.....	95
Cuadro 21: Cantidad de suelo erosionado año 2013, microcuenca Los Sujuyes.....	97
Cuadro 22: Valores del factor C asignados al tipo de cobertura .....	99
Cuadro 23: Valores del factor P para terrazas .....	100
Cuadro 24: Tasa de erosión hídrica potencial.....	103
Cuadro 25: Tasa de erosión hídrica actual.....	105
Cuadro 26: Tasas de erosión de suelo estimadas por el método directo e indirecto .....	107
Cuadro 27: Resumen de resultados de análisis físico de suelos .....	112
Cuadro 28: Valores de erodabilidad en función de la clase textural.....	113

CONTENIDO	PÁGINA
Cuadro 29: Escorrentía superficial estimada mediante el método directo e indirecto.....	114
Cuadro 30: Interacción de los principales factores que interviene en la erosión hídrica.....	120
Cuadro 31: Área cubierta por mangle .....	139
Cuadro 32: Área cubierta según tipo de mangle. ....	139
Cuadro 33: Resumen de los porcentajes de germinación.....	147
Cuadro 34: Análisis ANDEVA.....	147
Cuadro 35: Porcentaje de frutos con semillas .....	148
Cuadro 36: Porcentaje de semillas llenas y vanas por regiones del fruto .....	149
Cuadro 37: Aprovechamiento de los recursos hídricos en Guatemala.....	154
Cuadro 38: Caudal hídrico por vertiente .....	156
Cuadro 39: Oferta y uso de agua por vertiente en Guatemala.....	159
Cuadro 40: Demanda de agua para riego según sistema de riego y vertiente. Mm <sup>3</sup> .....	161
Cuadro 41: Demanda de agua en el sector doméstico. Mm <sup>3</sup> .....	161
Cuadro 42: Población neta por municipio de la Cuenca del Río Cristóbal .....	166
Cuadro 43: Uso actual de la Cuenca del Río Cristóbal, 2013 .....	167
Cuadro 44: Indicadores del recurso hídrico .....	171

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de ubicación de la Finca Camantulul.....	4
Figura 2: Estructura organizacional.....	5
Figura 3: Proyectos de reforestación desarrollados por el ICC y colaboradores. ....	17
Figura 4: Alumnos durante la celebración del día Mundial de agua. ....	18
Figura 5: Mapa de erosión hídrica, año 2012, Cuenca del río Cristóbal.....	19
Figura 6: Resumen gráfico del cumplimiento de actividades 2012 .....	21
Figura 7: Esquema general sobre la degradación de los suelos .....	29
Figura 8: Proceso de erosión Hídrica.....	36
Figura 9: Tipos de erosión hídrica .....	38
Figura 10: Erosión eólica causada por el viento en áreas desérticas.....	41
Figura 11: Esquema de una parcela de escurrimiento .....	48
Figura 12: Nomograma para determinar el Factor K, Erodabilidad del suelo .....	60
Figura 13: Ubicación de la microcuenca Los Sujuyes, según estratos altitudinales. ....	74
Figura 14: Acequias de ladera y cultivos a nivel, cultivo de caña de azúcar.....	76
Figura 15: Cobertura vegetal, microcuenca Los Sujuyes .....	77
Figura 16: Establecimiento de parcelas de escorrentía, Microcuenca Los Sujuyes.....	79
Figura 17: Sistema colectores de escorrentía y sedimentos.....	80
Figura 18: Croquis de la unidad experimental .....	81
Figura 19: Toma de muestras.....	83
Figura 20: Análisis en laboratorio .....	84

Figura 21: Esquema general de la metodología utilizada en MUSLE .....	86
Figura 22: Delimitación de una cuenca hidrográfica en ArcGis 10. ....	87
Figura 23: Determinación del factor topográfico (LS) de MUSLE en ArcGis 10 ®.....	90
Figura 24: Variación de las cantidades de suelo erosionado y precipitación .....	96
Figura 25: Comportamiento de la erosión hídrica en el cultivo de caña de azúcar .....	98
Figura 26: Mapa del factor topográfico (factor LS), microcuenca Los Sujuyes (2013) .....	101
Figura 27: Mapa del factor de Conservación (factor P) .....	102
Figura 28: Porcentajes de erosión hídrica potencial .....	103
Figura 29: Mapa de erosión potencial .....	104
Figura 30: Porcentaje de erosión hídrica actual (2013) .....	105
Figura 31: Mapa de erosión hídrica actual (2013).....	106
Figura 32: Variación de las tasas de erosión hídrica en el cultivo de caña de azúcar. ....	108
Figura 33: Variación de las tasas de erosión hídrica en la plantación forestal. ....	109
Figura 34: Variación de las tasas de erosión hídrica en plantación de hule. ....	109
Figura 35: Regresión lineal. Erosión observada Vrs. Erosión estimada .....	110
Figura 36: Escurrimiento directo Vrs Escurrimiento observado: caña de azúcar. ....	115
Figura 37: Escurrimiento directo Vrs Escurrimiento observado: plantación forestal.....	115
Figura 38: Regresión lineal, erosión (método indirecto) Vrs. Precipitación.....	116
Figura 39: Regresión lineal. Erosión (método directo) Vrs. Precipitación .....	116
Figura 40: Regresión lineal. Erosión (método indirecto) Vrs. Precipitación .....	117
Figura 41: Regresión lineal. Erosión (método directo) Vrs. Precipitación. ....	117
Figura 42: Árbol de problemas, microcuenca Los Sujuyes.....	119
Figura 43: <i>Avecenia germinans</i> . ....	135
Figura 44: <i>Laguncularia racemosa</i> .....	136
Figura 45: <i>Rhizophora mangle</i> .....	136
Figura 46: <i>Conocarpus erectus</i> .....	137
Figura 47: sistema de lavado de semillas.....	143
Figura 48: Distribución espacial de los tratamientos.....	144
Figura 49: Corte en semillas de <i>C. erectus</i> .. ....	145
Figura 50: Porcentajes de germinación de semillas botánicas forestales.....	146
Figura 51: Corte longitudinal a través de la semillas (A) y fruto (B). ....	148
Figura 52: Corte transversal y longitudinal de frutos y semillas de <i>C. erectus</i> .....	149
Figura 53: Cuencas hidrográficas de Guatemala.....	156
Figura 54: Distribución de usos consuntivos del agua.....	160
Figura 55: Microcuencas y red hídrica principal de la Cuenca del Río Cristóbal .....	165
Figura 56: Usos y usuarios del agua, Cuenca del Río Cristóbal .....	169
Figura 57A: Mapa de ubicación y distribución espacial de las parcelas de escurrimiento .....	175



**ESTUDIO DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA PARTE ALTA DE LA ZONA CAÑERA,  
MICROCUEENCA LOS SUJUYES, DIAGNÓSTICO Y SERVICIOS EN EL INSTITUTO  
PRIVADO DE INVESTIGACIÓN SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO -ICC-, SANTA LUCÍA  
COTZUMALGUAPA, ESCUINTLA, GUATEMALA, C.A.**

RESUMEN

El siguiente trabajo de graduación se realizó como parte del Ejercicio Profesional Supervisado de Agronomía -EPSA- en el período comprendido de febrero a noviembre de 2013; en el programa de Manejo Integrado de Cuencas del Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático -ICC-, ubicado en el municipio de Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla, Guatemala, C.A.

En el Capítulo I, se presenta el diagnóstico del programa de Manejo Integrado de Cuencas. El mismo contempló la recopilación y análisis de información primaria y secundaria, para identificar las áreas de trabajo que necesitaban ser reforzadas y así cumplir con los objetivos de dicho programa, tomando como año base el 2012. Según el director del ICC (Dr. Alex Guerra), en este año se iniciaron las labores con normalidad del ICC (ICC 2012). Se determinó que el área de trabajo relacionada con el apoyo a la protección de suelos, necesitaba ser reforzada, por lo que se hizo necesario realizar una investigación para dar a conocer a sus colaboradores (ingenios azucareros) la cantidad de suelo erosionada, por procesos de erosión hídrica, presentada bajo las diferentes coberturas vegetales existentes en la parte alta de la zona azucarera, esto como punto de partida para la divulgación de prácticas productivas enfocadas a la conservación de suelos.

En el Capítulo II se presenta el trabajo de investigación. Por medio de un análisis temporal y espacial, utilizando la Ecuación Universal de la Pérdida del Suelo Modificada, EUPSM o MUSLE (por sus siglas en inglés) y su validación por medio de parcelas de escurrimiento. Se estimó la pérdida de suelo por procesos de erosión hídrica en la microcuenca Los Sujuyes (parte alta de la zona cañera de Guatemala). Se instalaron cuatro parcelas de escurrimiento en distintas ubicaciones dentro de la microcuenca, cada una con diferente

cobertura vegetal; cultivo de caña de azúcar, plantación forestal de eucalipto y una plantación de hule. Mediante un sistema de información geográfica se realizó una modelación de la erosión.

Los resultados mostraron que las tasas de erosión estimadas mediante parcelas de escurrimiento y Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (EUPSM o MUSLE) para los diferentes usos, se encuentran, según la clasificación de la FAO, en un nivel de erosión moderada, esto sin considerar el efecto de las prácticas de conservación de suelos que se tiene en la microcuenca; siendo el área bajo la cobertura de caña de azúcar la que presenta la mayor tasa de erosión, seguida del área bajo la cobertura de hule y finalmente el área bajo la cobertura de eucalipto; sin embargo la modelación de la erosión hídrica con el sistema de información geográfica mostró que las prácticas de conservación de suelos disminuyen la erosión a un nivel leve o nulo. Según características físicas de los suelos de la microcuenca, estos presentaron un alto porcentaje de porosidad y una clase textural de tipo gruesa, las cuales les brindan una alta permeabilidad y como consecuencia una escorrentía superficial menor al 10% de la precipitación. La microcuenca Los Sujuyes vista como un sistema y separada en tres subsistemas de producción, refleja en términos generales un manejo adecuado, no solo del recurso suelo sino también de las variables que afectan la erosión hídrica, a saber, uso de la tierra, pendiente, cobertura (época de siembra y de corte) y prácticas de conservación de suelos; por lo que se considera como un modelo productivo que debe ser divulgado y replicado en otras áreas de la parte alta de la zona cañera guatemalteca.

Finalmente, en el Capítulo III se tienen los servicios que contribuyen a reforzar otras áreas de trabajo del programa de manejo integrado de cuencas, siendo estos los siguientes: evaluación de cinco tratamientos germinativos para semillas botánicas de Mangle botoncillo (*Conocarpus erectus*), provenientes de Tahuexco, Suchitepéquez, donde se determinó el factor principal que contribuye a que esta especie tenga un bajo porcentaje de germinación, esto como apoyo al área referente al manejo y protección de bosques. Para el segundo servicio se estableció información necesaria para generar una base de datos sobre usos y usuarios del agua del río Cristóbal, el cual contribuye en cumplimiento de los objetivos del área de trabajo referente al manejo integrado del agua.





**1 CAPÍTULO I. DIAGNÓSTICO DEL PROGRAMA DE MANEJO INTEGRADO DE CUENCAS, INSTITUTO PRIVADO DE INVESTIGACIÓN SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO, SANTA LUCÍA COTZUMALGUAPA, ESCUINTLA, GUATEMALA, C.A.**

## **1.1 PRESENTACIÓN**

Es un hecho que el clima ha variado a lo largo de la historia de la Tierra, debido a la variación de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI), aerosoles en la atmósfera, las variaciones de la cubierta terrestre y de la radiación solar, que alteran el equilibrio energético del sistema climático (-IPCC-, 2008). Por ello, el Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático – ICC - fue fundado con el objetivo de desarrollar programas de investigación, que contribuyan al diseño de estrategias de reducción de la vulnerabilidad, de mitigación y adaptación al cambio climático, en comunidades, sistemas productivos e infraestructura de la región de influencia de los ingenios que integran la Asociación de Azucareros de Guatemala (ASAZGUA).

Para lograr estos objetivos, el ICC creó cinco programas, enfocándose dos de ellos en investigación (programa de clima e hidrología y el programa de ecosistemas); otros dos se encargan de implementar y promover acciones a nivel de campo (programa de manejo Integrado de cuencas y programa de gestión de riesgo de desastres); y el quinto coordina el desarrollo de capacidades y la divulgación (programa de desarrollo de capacidades y divulgación). Aunque el ICC tiene planificado realizar acciones en todas las cuencas de la vertiente del Pacífico, se han priorizado –de acuerdo a su ubicación dentro de la zona cañera- cuatro de ellas, siendo estas: Coyolate, Acomé, Achiguate y María Linda (ICC, 2012).

Mediante la realización del diagnóstico del programa de Manejo Integrado de Cuencas, se identificaron las áreas de trabajo que necesitan ser reforzadas y así cumplir con los objetivos de dicho programa. Esta es la primera fase del Ejercicio Profesional Supervisado -EPS-, que contempló la recopilación y análisis de información primaria y secundaria, para describir el entorno y procesos productivos del programa de Manejo Integrado de Cuencas, tomando como año base el 2012. Según el director Dr. Alex Guerra (director del ICC), en este año se iniciaron las labores con normalidad del ICC (ICC 2012); por lo que constituyó la principal fuente para la identificación del tema de investigación, servicios a ejecutar y el cumplimiento de los requerimientos de la institución.

## **1.2 MARCO CONCEPTUAL**

### **1.2.1 Ubicación**

El Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático –ICC- se encuentra ubicado en la finca Camantulul, km 92.5 carretera a Mazatenango, en las oficinas de Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar (CENGICAÑA), Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla.

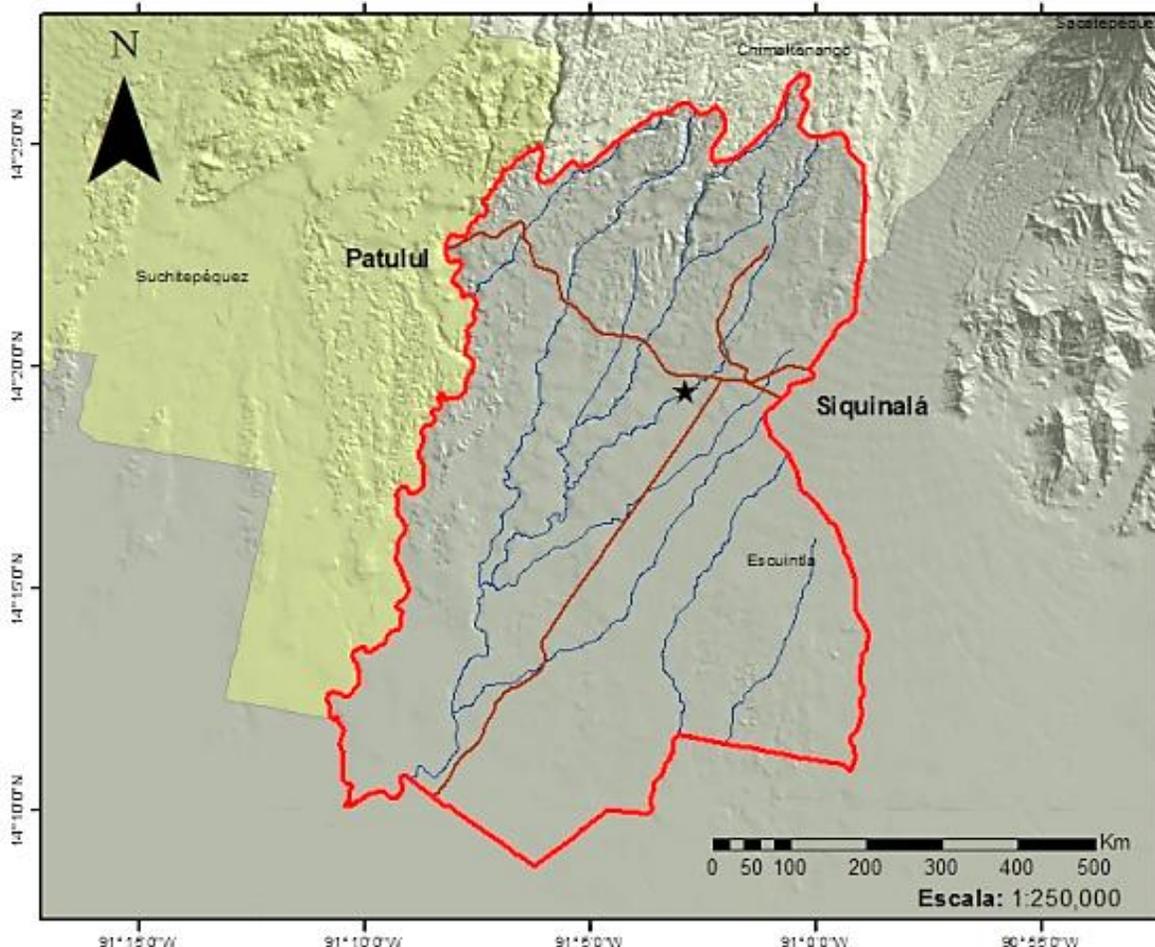
El municipio de Santa Lucía Cotzumalguapa tiene una extensión territorial de 432 Km<sup>2</sup> y una elevación media de 356 metros sobre el nivel del mar. La distancia a la cabecera departamental es 34 Km., y a la ciudad capital es 90 Km, ubicándose en las coordenadas geográficas: Latitud: 14° 18' N Longitud: 91° 1' W (figura 1).

### **1.2.2 Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático**

El Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático es la institución fundada por el sector azucarero de Guatemala, para contribuir en acciones que desarrollen procesos adecuados de mitigación y adaptación al cambio climático en las comunidades, procesos productivos e infraestructura en la región (ICC, 2011). El instituto tiene como objetivo principal, ser una institución privada, líder en investigación y promoción de proyectos, para la mitigación y la adaptación al Cambio Climático en las comunidades, los procesos productivos y la infraestructura de la región de influencia de sus miembros.

La Visión del instituto es ser una institución privada líder en investigación y promoción de proyectos, para la mitigación y la adaptación al Cambio Climático en las comunidades, los procesos productivos y la infraestructura de la región de influencia de sus miembros. Su misión es: Crear y promover acciones y procesos que faciliten la mitigación y la adaptación al cambio climático en la región, con base en lineamientos técnico-científicos.

# Mapa de Ubicación, Finca Camantulul, Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla



Ubicación de la Finca Camantulul

- ★ Finca Camantulul
- ▭ Límite municipal Santa Lucía Cotz.
- Red Vial
- Ríos

Sistema de Proyección: GTM  
 Datum: WGS 84  
 Editado por: Marie Andrée Liere  
 Guatemala 2011

Fuente: MAGA



Figura 1: Mapa de ubicación de la Finca Camantulul. Fuente: Liere Quevedo (2012).

### 1.2.3 Programas del Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático

Debido a que el instituto es una organización de apoyo, desde el comienzo se dio a conocer entre sus miembros, organizaciones relacionadas y actores locales, siendo los mecanismos de apoyo contemplados en: 1) generar información y estudios que sirvan de insumo para la planificación y la toma de decisiones; 2) impulsar proyectos y acciones con base científica, técnica y viabilidad económica; y 3) contribuir con el desarrollo de capacidades en grupos clave de la sociedad (ICC 2012). Los objetivos principales que se persiguen son:

- a) Aportar a la disminución del impacto de eventos climáticos sobre poblados, sistemas de producción e infraestructura
- b) Contribuir a la reducción de gases de efecto invernadero
- c) Facilitar la adaptación de las comunidades, sistemas de producción e infraestructura al clima futuro.

Para lograr estos objetivos, se crearon cinco programas, los cuales se aprecian en la figura 2. Dos de ellos (en azul oscuro), se enfocan en investigación, otros dos (en verde), se encargan de implementar y promover acciones; y el quinto coordina el desarrollo de capacidades y la divulgación.



Figura 2: Estructura organizacional. Fuente: Sitio (ICC 2011)

**a. Programa de Investigación en Clima e hidrología**

Su objetivo es generar información y análisis sobre el clima y los recursos hídricos, para mejorar la toma de decisiones relacionadas a los retos presentes y futuros, del cambio climático.

**Actividades principales:**

- Administración de la red de estaciones del sector azucarero
- Elaborar Modelos climáticos y amenazas potenciales
- Realizar Estudios de inundaciones
- Realizar Análisis de eventos extremos.

**b. Programa de Investigación en Ecosistemas**

Su objetivo es generar y validar conocimiento que contribuya a mantener los servicios que los bosques y los sistemas agrícolas prestan a la sociedad.

**Actividades principales**

- Inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)
- Procesos y/o alternativas tecnológicas para reducir las emisiones de GEI
- Diseño de corredores biológicos
- Aumentar la capacidad de adaptación de ecosistemas

**c. Programa de Manejo integrado de cuencas**

Este programa persigue impulsar e implementar acciones para mantener la integridad de los recursos naturales en las cuencas tomando en cuenta su contexto social.

**Actividades principales**

- Fomento y acompañamiento de procesos de organización social para el manejo de cuencas (en los primeros años, se trabajará las cuencas prioritarias de la zona cañera de la Costa Sur).
- Promoción de manejo y protección del bosque.
- Apoyar el manejo integrado del agua.

#### **d. Programa de Gestión de riesgo de desastres**

Este programa persigue influir en la reducción de riesgo de desastres, impulsando acciones con base en el análisis de factores naturales y sociales.

##### **Actividades principales:**

- Evaluación de la vulnerabilidad de poblados, infraestructura y sistemas de producción
- Análisis de amenazas, especialmente de las inundaciones
- Elaboración de propuestas de obras, para reducción de desastres y adaptación al cambio climático.

#### **e. Programa de Desarrollo de capacidades y divulgación**

Su objetivo es difundir información y conocimientos, que aumenten la capacidad de la población y de los sistemas productivos de mitigar y adaptarse al cambio climático.

##### **Actividades principales:**

- Capacitaciones a grupos clave de la población, sobre el cambio climático.
- Elaborar publicaciones sobre el cambio climático.
- Asesoría técnica para la mitigación y adaptación al cambio climático.

#### **1.2.4 Equipo profesional ICC**

##### **Dirección General**

Dr. Alex Alí Guerra Noriega

##### **Asesor**

Dr. Luis Alberto Ferraté Felice

##### **Gestor de proyectos**

M.Sc. Martín Pérez Álvarez

##### **Programa de Investigación en Clima e Hidrología**

Coordinación

Ing. M.Sc. José Alfredo Suárez Urrutia

Investigador en hidrología

Lic. Sergio Gil Villalba

Técnico

P.Agr. Carlos Aníbal Ramírez Calo

Practicante doctoral

M.Sc. Milton Chán Santisteban

##### **Programa de Investigación en Ecosistemas**

Coordinación

Ing. M.Sc. Alejandra Hernández Guzmán

Técnico SIG y asistente de investigación en Ecosistemas  
 Practicante universitaria (EPS-FAUSAC)  
 Practicante universitario (EPS-CUNSUROC)  
 Practicante Perito Agrónomo (EFA San Marcos)

Dmo. Gonzalo Alexander López Franco  
 P.Agr. María Alejandra Rosales Mayorga  
 P.Agr. Elmer Adolfo Orrego León  
 Ckristian Dannel Tartón Sisimit

### **Programa Manejo Integrado de Cuencas**

Coordinación  
 Técnico  
 Técnico  
 Practicante universitaria (EPS-FAUSAC)  
 Practicante Perito Forestal (ESTEFFOR)

Ing. Agr. Luis Enrique Reyes García  
 P. Agr. Juan Andrés Nelson Ruiz  
 Bach. Jorge Luis Estrada Vela  
 P.D. Marie Andrée Liere Quevedo  
 Iris María Santos Yanes

### **Programa Gestión de Riesgo de Desastres**

Coordinación  
 Técnico

Arq. German Gualberto Alfaro Ruiz  
 P. Admon. Francisco Alejandro Fuentes González

### **Programa Desarrollo de Capacidades y Divulgación**

Coordinación

Ing. M.A. Pablo Yax López

### **Desarrollo Institucional**

Asesor  
 Gestor de proyectos e investigador en economía ambiental

Dr. Luis Ferraté Felice  
 M.Sc. Martín Pérez Álvarez

### **Proyecto sobre Adaptación al Cambio Climático para USAID/Guatemala**

Consultor nacional  
 Consultor nacional  
 Consultor internacional (Global Climate Adaptation Partnership – GCAP)  
 Consultora internacional (Global Climate Adaptation Partnership – GCAP)  
 Consultora internacional (Grupo Laera de Colombia)

Arq. Jorge Cabrera  
 Lic. en Economía Sergio Vega  
 Dr. Thomas Downing  
 Dra. Fernanda Zermoglio  
 Dra. Carmen Lacambra

### **Proyecto sobre Adaptación al Cambio Climático para USAID/Guatemala**

**Coordinador**  
**Administrador de proyecto**

M.A. Pablo Yax López  
 M.Sc. Martín Pérez Álvarez

**Asistente profesional**

**Asistente profesional**

**Asistente técnico**

**Personal de campo**

**Personal de apoyo**

Asistente administrativo

Apoyo en campo y oficinas

Inga. Agr. Marie Andrée Liere Quevedo

Ing. Agr. Elmer Adolfo Orrego León

Lic. Santos Alvarez

Diego Perechú Tzoc, Roberth Antonio

López Morales, Selvin Manual Zarat

Barrios y Rogelio Yanes Gutiérrez

P.C. Luis Obed López Choquín

Carlos Israel Tivo Ávila, Romelia de

Jesús Barrios y Silvia Margarita Coyán

Chamo

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo general**

1.3.1.1 Realizar el diagnóstico del Programa de Manejo Integrado de Cuencas –MIC-, para conocer las actividades que se realizan en cada área de trabajo.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

1.3.2.1 Recopilar información sobre las principales área de trabajo del programa de MIC.

1.3.2.2 Evaluar el impacto que ha generado el programa de MIC, en su área de influencia.

1.34.2.3 Definir y priorizar la problemática presentada en el programa de MIC.

## **1.4 METODOLOGÍA**

### **1.4.1 Principales área de trabajo del programa de MIC**

Para identificar las principales áreas de trabajo del programa de Manejo Integrado de Cuencas, se revisaron documentos generados por la institución y en la institución, tales como el informe de labores 2011 y 2012, Plan operativo anual 2012, trabajos de graduación a nivel de diversificado y de licenciatura desarrollados dentro del programa, boletines climáticos generados por el ICC y la página en internet de la institución, además se entrevistaron a personas que integran o mantienen una relación con el programa de MIC.

Utilizando el Plan Operativo Anual –POA- 2012, generado por el Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático –ICC-, se realizó una separación de las actividades que estaban a cargo del programa de Manejo Integrado de Cuencas –MIC-. En este POA, se encontraban los porcentajes de cumplimiento de las actividades planteadas al inicio del 2012. Las actividades planteadas en el POA, fueron clasificadas según el área de trabajo (Manejo integrado del agua, protección de suelo, manejo y protección de bosques, recopilar y generar información básica de las cuencas y fomentar y acompañar procesos de organización social para el manejo de cuencas), con esto se planteó un porcentaje de cumplimiento por área de trabajo.

### **1.4.2 Evaluación del impacto generado por el programa de MIC en su área de influencia**

Para conocer el impacto del programa en las zonas de acciones del ICC, se utilizaron mapas en los que se encuentran los puntos de ubicación de actividades desarrolladas por el programa de MIC. Además se consultaron documentos sobre evidencias del desarrollo de actividades (fotos, revistas, boletines, shapes, etc.).

### **1.4.3 Definir y priorizar la problemática del programa de MIC**

Con los porcentajes obtenidos por área de trabajo, se obtuvo una sumatoria, la cual representa el total cumplido. Este resultado fue utilizado para obtener el porcentaje neto de cumplimiento de actividades por área de trabajo, graficándose los mismos para observar el grado de alcance por cada área de trabajo, del programa durante el 2012. Con estos resultados se priorizó el área que necesitaba más soporte técnico.

## 1.5 RESULTADOS

### 1.5.1 Principales área de trabajo del programa de MIC.

Mediante la recopilación y análisis de información de fuentes primarias (entrevistas a los actores principales) y fuentes secundarias (documentos generados en el programa de manejo integrado de cuencas), se establecieron las principales actividades de cada área de trabajo del programa para el año 2012, utilizando además el Plan Operativo Anual (POA), 2012. Con esta comparación, se logró el contraste entre las actividades planteadas al inicio y las actividades cumplidas al final del 2012, obteniendo así una vista global del cumplimiento de las actividades planteadas (cuadro 1).

**Cuadro 1: Porcentajes de cumplimiento de las principales actividades por área de trabajo, año 2012.**

Área de trabajo del programa de MIC	Actividades específicas	Cumplimiento/ actividad %	Observaciones	Cumplimiento/ área de trabajo %
Contribuir en la protección de suelos	Estudio de zonas de sedimentación en cuencas, subcuencas o microcuencas prioritarias	0	No hay mapa de zonas de sedimentación. Se realizó un estudio de sedimentación en la finca El Baúl como parte de la evaluación de acequias.	45
	Propuestas de estructuras y/o prácticas de conservación de suelos	90	Se realizó un estudio de sedimentación en una finca de El Baúl. Falta incluir las recomendaciones para utilizar las acequias como medida.	
Incidir en el manejo y protección de bosques	Plantaciones energéticas para disminuir presión a ecosistemas estratégicos	110	Pendiente de entregar el informe específico.	121
	Implementación de por lo menos un mecanismo de protección de bosques	0	Se trasladó para el Plan Operativo 2013. La elaboración de la propuesta y su validación con los actores de la cuenca tomó más tiempo.	

	Producción de Plantas	<b>120</b>	Especies nativas maderables y energéticas. Informe pendiente.
	Plantación de especies forestales nativas	<b>152</b>	Falta entregar informe
	Apoyo en la prevención y control de incendios forestales	<b>100</b>	Falta el informe
Recopilar y generar información básica de las cuencas y establecer la línea base	Aportar a la elaboración de planes de manejo de cuencas, subcuencas o microcuencas estratégicas (piloto con Cristóbal e Ixtacapa)	<b>100</b>	Se hizo un plan de manejo para el río Cristóbal. Para Ixtacapa se elaboró plan de monitoreo, propuesta de protección de bosques y la caracterización, aunque no un plan de manejo como tal.
	Apoyar el monitoreo de ejecución de planes de manejo de cuencas	<b>25</b>	
	Alianzas estratégicas	<b>70</b>	Se firmó una carta de entendimiento con Asociación Vivamos Mejor y se tiene el borrador de la carta con CATIE.
Fomentar y acompañar procesos de organización social para el manejo de cuencas	Apoyo a organizaciones de cuencas, gobiernos locales en proceso de planificación y ejecución	<b>100</b>	ADRI, ACAX y CEDIG. FALTA INFORME
	Giras de intercambio de experiencias	<b>100</b>	1 como parte del curso de cuencas, 2 en Ixtacapa, 1 con actores de cuenca María Linda y las relacionadas al Diplomado CC. Falta informe.
	Caracterización de cuencas, subcuencas o microcuencas estratégicas	<b>150</b>	Se hicieron 6: Coyolate, Acomé, Achiguate, Los Esclavos, María Linda, Paso Hondo, Ixtacapa y Cristóbal.
Apoyar el manejo integrado del agua	Promoción de manejo integrado del agua (municipalidad de Santa Lucía Cotz. y en el Comité de Manejo del Agua)	<b>75</b>	Se apoyó a la Municipalidad de Santa Lucía Cotz. Falta informe.
			<b>63</b>
			<b>105</b>
			<b>62.5</b>

Descripción de usos y usuarios del agua en dos cuencas, subcuencas o microcuencas	<b>50</b>	
---	-----------	--

Fuente: Plan Operativo Anual –POA- (ICC 2012)

En el cuadro 1, se observan los porcentajes de cumplimiento de cada actividad reportados por el equipo de trabajo del programa de MIC. Para el año 2012, se superaron los objetivos establecidos en dos de sus áreas de trabajo, debido a la demanda de los socios y colaboradores del ICC, predominando el área encargada de impulsar el manejo y protección de bosques, enfocándose los esfuerzos principalmente en actividades, como reforestaciones de especies forestales nativas y energéticas, producción de plantas; la otra área fue el área de fomento y acompañamiento de procesos de organización social para el manejo de cuencas, siendo las principales actividades la caracterización de cuencas, subcuencas y microcuencas (Acomé, Los esclavos, Achiguate, Ixtacapa, Cristóbal y Paso Hondo), y apoyo a organizaciones de cuencas, gobiernos locales en proceso de planificación y ejecución.

El área de recopilar y generar información básica de las cuencas y establecer líneas base, se enfocó en actividades como el apoyo en la elaboración de planes de manejo de cuencas, subcuencas o microcuencas estratégicas (piloto con Cristóbal e Ixtacapa), mientras que el área de apoyo en el manejo integrado del agua, se enfocó en la promoción de manejo integrado del agua, específicamente en coordinación con la municipalidad de Santa Lucía Cotzumalguapa. Finalmente el área contribuir en la protección de suelos, se centró en la evaluación de acequias de ladera, como prácticas de conservación de suelos, en la parte alta de la zona cañera.

### 1.5.2 Evaluación del impacto generado por el programa de MIC en su área de influencia.

El programa de Manejo Integrado de Cuencas, generó y desarrolló más de 30 proyectos y acciones durante el 2012, en la Vertiente del Pacífico en coordinación con distintas entidades (cuadro 2).

**Cuadro 2. Proyectos y acciones desarrolladas y generadas en el 2012. Programa Manejo Integrado de Cuencas**

Número	Proyecto	Coordinación con:
1	Vivero forestal comunitario y reforestación	INAB Región IX
2	Vivero forestal comunitario y reforestación	INAB Región IX
3	Vivero forestal comunitario y reforestación	INAB Región IX
4	Vivero forestal comunitario y reforestación	INAB Región IX
5	Vivero forestal comunitario y reforestación	INAB Región IX
6	Vivero forestal comunitario y reforestación	INAB Región IX
7	Vivero forestal comunitario y reforestación	INAB Región IX
8	Vivero forestal comunitario y reforestación	INAB Región IX
9	Vivero forestal comunitario y reforestación	ASOBORDAS
10	Vivero forestal	Asociación amigos del río Ixtacapa-INAB Región IX
11	Vivero forestal	Reservas Militares-INAB Región IX
12	Vivero forestal	Hacienda La Esperanza
13	Reforestaciones	Comunidad Nuevo Coyolate Sur, Patulul, Suchitepéquez
14	Reforestación Santa Catarina Barahona	COCODE Santa Catarina Barahona
15	Producción de plantas forestales	Ingenio Magdalena
16	Plantaciones con especies energéticas	ASOBORDAS
17	Apoyo a reforestación con fines de conservación Ingenio Palo Gordo	Ingenio Palo Gordo
18	Apoyo a reforestación con fines de conservación Ingenio el Pilar	Ingenio El Pilar
19	Apoyo a reforestación con fines de conservación Ingenio Pantaleón	Ingenio Pantaleón
20	Apoyo a reforestación con fines de conservación Ingenio Magdalena	Ingenio Magdalena
21	Apoyo a reforestación MARN-Retalhuleu	MARN-Retalhuleu
22	Apoyo a Reforestación con fines de conservación Ingenio Madre Tierra 4 ha.	ASOBORDAS e Ingenio Madre Tierra
23	Ensayo acequias de ladera en Caña	Ingenio Pantaleón
24	Apoyo al depto. de agua	Municipalidad Santa Lucia Cotz.

25	Propuesta de uso de la tierra para reducir la vulnerabilidad a inundaciones, en la sub cuenca del río Cristóbal, Guatemala.	FAUSAC
26	Apoyo a la gestión del proyecto "Cogestión del manejo sustentable y conservación del Volcán de Acatenango y Parque Regional Municipal Volcán de Acatenango"	CATIE-OTN
27	Fortalecimiento a la Asociación Amigos del río Ixtacapa	Asociación amigos del río Ixtacapa
28	Diagnostico Forestal Participativo, comunidad San Marcos Niza, Suchitepéquez	INAB
29	Caracterización y Diagnostico de la cuenca del río Cristóbal	FAUSAC
30	Proyectos de reforestación AGRECA	AGRECA
31	Vivero Forestal y Arboreto (CENGICAÑA)	CENGICAÑA
32	Ejecución del proyecto "Cogestión del manejo sustentable y conservación del Volcán de Acatenango y Parque Regional Municipal Volcán de Acatenango"	CATIE-OTN, Municipalidad Acatenango
33	Apoyo y participación en evento HIDROINDUSTRIA	AGEXPORT
34	Proyecto pequeñas donaciones	FCA
35	Proyecto vivero forestal	CEDIG
36	Fortalecimiento a cuadrillas de guardabosques	INAB, ADRI

Fuente: ICC 2013

#### Resultados principales:

- Manejo y protección del bosque:** según el informe de labores para el año 2012, el total de las plantas reforestadas excedieron las 200,000 (figura 3). Los enfoques de las reforestaciones con los ingenios, se centraron en las riberas de ríos, mientras que para las comunidades fue para aumentar la diversidad biológica dentro de sus territorios. La producción de plantas para el año 2012, incluyó para algunas de las comunidades, especies procedentes de la región, debido a que éstas tienen poca difusión. Del total de las plantas forestales nativas que se sembraron, aproximadamente un 50% se produjo en viveros coordinados por el ICC y el otro 50%, se compró a diferentes viveros.

En el 2012, el ICC a través del programa de Manejo integrado de cuencas, se fortaleció a la brigada de bomberos forestales de la municipalidad de Acatenango con equipo y se capacitó a los guardabosques de nueve comunidades de Nahualá, en temas de prevención de incendios forestales.

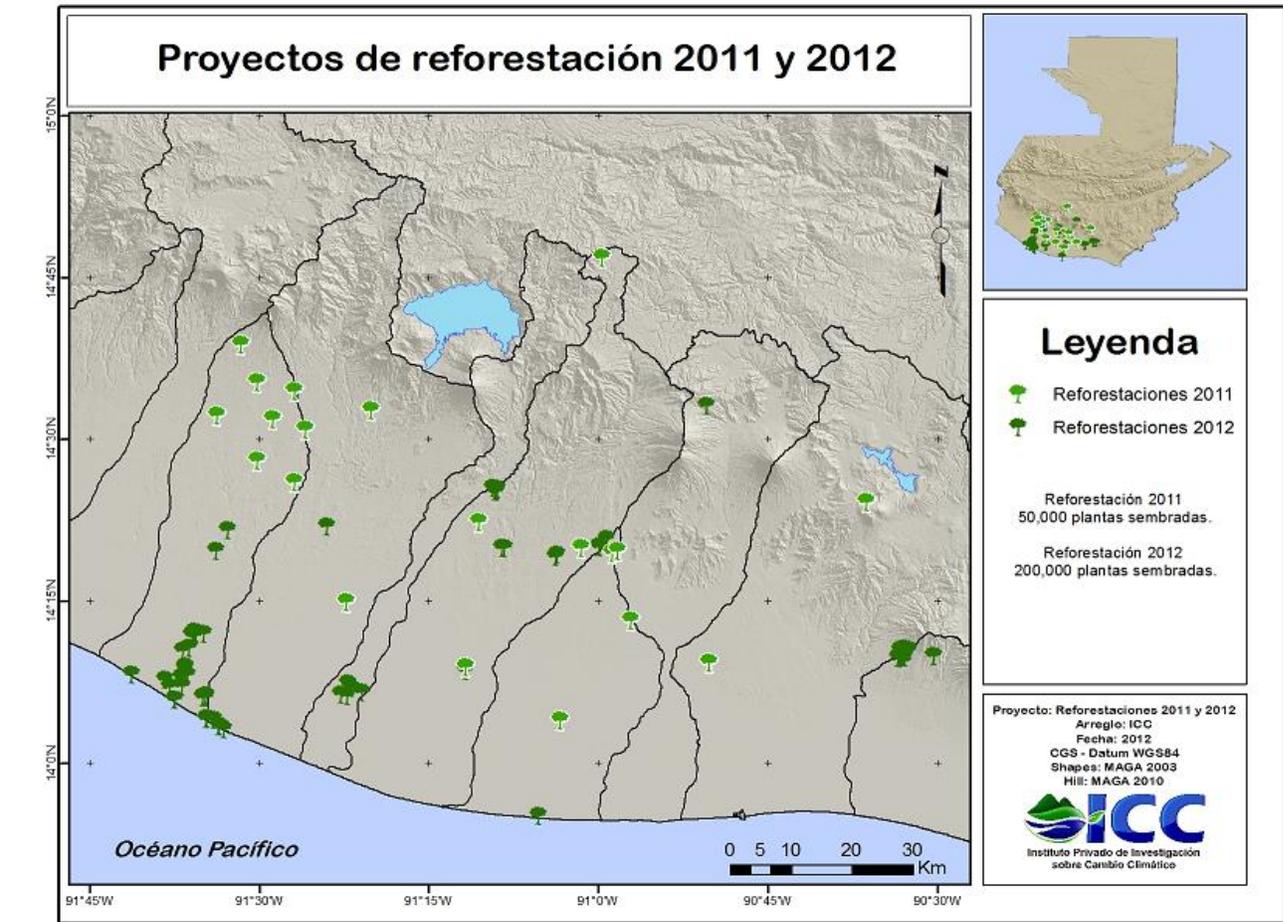


Figura 3: Proyectos de reforestación desarrollados por el ICC y colaboradores.

- **Apoyo en el manejo integrado de cuencas:** para ésta área de trabajo del programa de manejo integrado de cuencas, se basó principalmente en apoyar a la comunidad de Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla, para incrementar su oferta hídrica al identificar fuentes de agua superficiales disponibles y la determinación de los caudales correspondientes.

Además se colaboró con la educación y sensibilización, por medio de la celebración del día mundial de agua, en la que participaron alumnos de distintos establecimientos, quienes caminaron por las calles del municipio, con el fin de sensibilizar a la población sobre el uso del agua (figura 4).



**Figura 4: Alumnos de diferentes establecimientos educativos del municipio de Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla, durante la celebración del día Mundial de agua.**

- **Protección de los suelos:** El ICC en coordinación con el ingenio Pantaleón, evaluaron las acequias de ladera, en el cultivo de caña de azúcar, como medidas para el control de la erosión, obteniendo como resultado que el total de suelo retenido por las acequias, en la época lluviosa del 2012, fue de 115 T/Ha; esto debido a que según el ICC, esta práctica de conservación de suelos puede ser percibida como un gasto innecesario y, por ende, se invierte poco cada año.

Por otro lado, en coordinación con estudiantes del curso de Manejo Integrado de Cuencas, de la Facultad de Agronomía, de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se cuantificó la erosión en la cuenca del río Cristóbal, a través de un sistema de información geográfica y la ecuación universal de pérdida del suelo modificada –EUPSM o MUSLE por sus siglas en inglés-. Con la información generada, se determinó que existe una erosión potencial de 8,194,881.46 toneladas de suelo, las cuales se pierden durante un año, si se asume un período de retorno de dos años. Así mismo se estableció que la pérdida promedio por hectárea es de 203.24 toneladas (figura 5).

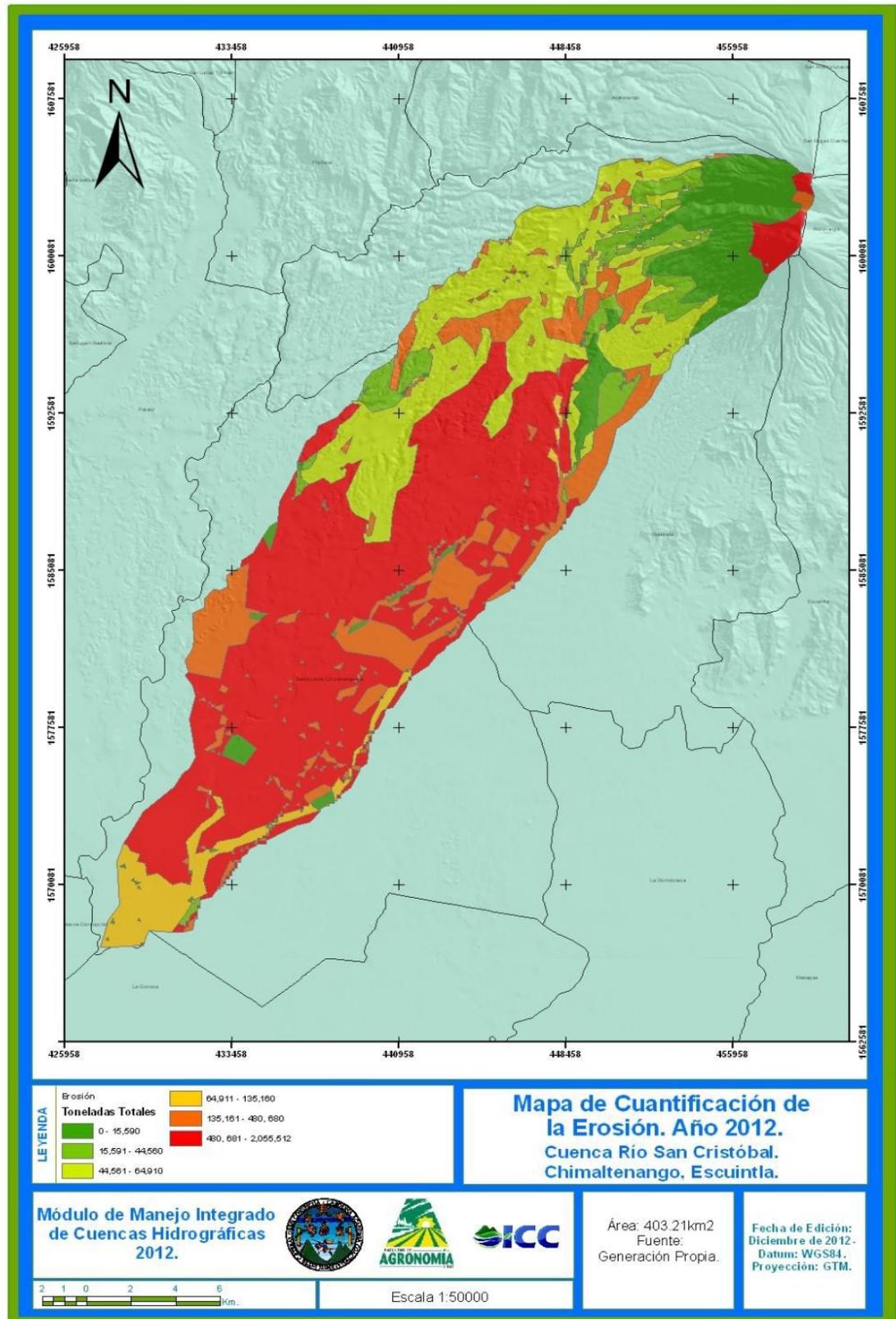


Figura 5: Mapa de erosión hídrica, año 2012, Cuenca del río Cristóbal. Fuente: FAUSAC e ICC 2012

- **Manejo integrado del agua:** En el 2012 se apoyó a la municipalidad de Santa Lucía Cotzumalguapa, para incrementar su oferta hídrica al identificar fuentes de aguas superficiales y disponibles y la determinación de los caudales correspondientes. Además se gestionó con el departamento de DEMUR (Programa de Desarrollo Municipal Participativo) de FUNDAZUCAR, la elaboración de un estudio de factibilidad para ampliar la cantidad de caudal en el municipio.

### 1.5.3 Definir y priorizar la problemática del programa de MIC.

En el cuadro 1, se observan los porcentajes de cumplimiento de cada actividad reportados por el equipo de trabajo del programa de MIC. Basándose en este porcentaje de cumplimiento, se obtuvieron los porcentajes de cumplimiento por áreas de trabajo, los cuales indican la dirección de los esfuerzos y recursos (cuadro 3).

**Cuadro 3: Porcentajes de cumplimiento de actividades según área de trabajo**

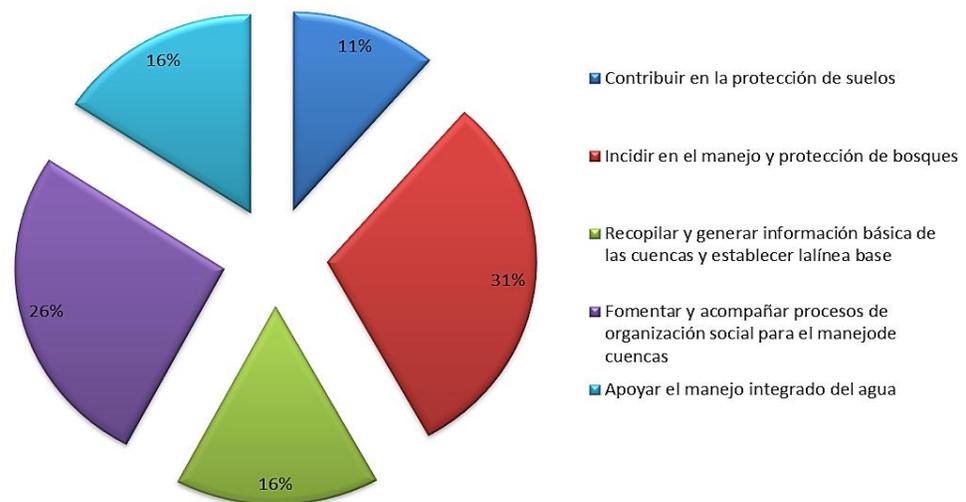
<b>Área de Trabajo</b>	<b>Cumplimiento (%)</b>
Incidir en el manejo y protección de bosques	31
Fomentar y acompañar procesos de organización social para el manejo de cuencas	26
Recopilar y generar información básica de las cuencas y establecer líneas base	16
Apoyar en el manejo integrado del agua	16
Contribuir en la protección del suelo	11
<b>Total</b>	<b>100</b>

Según resultados mostrados en el cuadro 3, las áreas que recibieron mayor atención y en la que se enfocaron los recursos, tanto humanos como materiales, fueron las áreas de trabajo referentes a: incidir en el manejo de protección de bosques (31% de cumplimiento) y en el área de fomentar y acompañar procesos de organización social para el manejo de cuencas (26% de cumplimiento); debido a que los interesados y colaboradores fueron

varios, de los que destacan ingenios como Magdalena, Palo Gordo, El Pilar y Pantaleón, y entidades como el INAB región IX, asociaciones y comunidades, todas estas ubicadas en la Vertiente del Pacífico.

En cuanto a las dos siguientes áreas de trabajo: manejo integrado del agua y recopilación y generación de información básica de las cuencas para establecer líneas base, los porcentajes de cumplimiento fueron del 16% para cada área, debido principalmente a que la elaboración de planes de manejo son laboriosos y se necesita personal capacitado para tratar estos temas, siendo la Universidad de San Carlos de Guatemala, a través de la Facultad de Agronomía, un colaborador fuerte.

Finalmente el área con el menor porcentaje de cumplimiento (11%), fue la de protección de suelos, ya que a pesar del uso potencial de prácticas de conservación de suelos, como la acequias de ladera, las cuales son percibidas como un gasto innecesario y por ende se invierte poco cada año. Es por ello, que el ICC en el 2012, evaluó estas acequias con el objetivo de despertar el interés en la aplicación de esta práctica de conservación de suelo, pero aún no se conoce con exactitud, la cantidad real de suelo que se pierde cada año por procesos de erosión hídrica. Lo anterior indica, que el área de protección de suelos necesita soporte técnico. La figura 6, muestra los porcentajes de cumplimiento por área de trabajo del programa de MIC para el año 2012.



**Figura 6: Resumen gráfico del cumplimiento de actividades 2012: Porcentaje de cumplimiento según áreas de trabajo del programa de MIC**

## 1.6 CONCLUSIONES

1. El programa de manejo integrado de cuencas cuenta con cinco principales áreas de trabajo, dentro de las que destacan el área de manejo y protección de bosques, donde las principales actividades son las reforestaciones de especies forestales nativas y energéticas, seguida del área de fomentar y acompañar procesos de organización social, para el manejo de cuencas, con actividades como la caracterización de cuencas, subcuencas y microcuencas prioritarias, dentro de la Vertiente del Pacífico.
2. El ICC a través del programa de manejo integrado de cuencas, ha realizado reforestaciones en la Vertiente del Pacífico, excediendo las 200,00 plantas sembradas en coordinación con ingenios, comunidades e instituciones sociales. Además ha coordinado con la municipalidad de Santa Lucía Cotzumalguapa, para incrementar la oferta hídrica a través de la identificación de fuentes de agua superficiales disponibles y ha iniciado con la divulgación de beneficios ambientales y económicos, de la implementación de prácticas de conservación de suelos.
3. Las principales áreas de trabajo que han tenido mayor porcentaje de cumplimiento de actividades durante el 2012, son la de incidir en el manejo y protección de bosques y la de fomentar y acompañar procesos de organización social para el manejo de cuencas, mientras que las áreas de apoyo en el manejo integrado del agua y la recopilación y generación de información básica de las cuencas, son las que se encuentran con un nivel de cumplimiento medio, mientras que el área de protección de suelos, es la que posee un menor porcentaje de cumplimiento con un 11%, por lo que esta área es la que necesitan más soporte técnico.

## 1.7 RECOMENDACIONES

1. Reencaminar esfuerzos dirigidos al desarrollo de las áreas de trabajo que poseen un porcentaje bajo de cumplimiento, según evaluación del Plan Estratégico Anual 2012.
2. Contratación de personal dirigido para temas específicos, como: protección de suelos, gestión del agua, protección de bosques, etc.
3. Realizar un estudio sobre erosión del suelo, en la parte alta de la zona cañera para establecer las bases e iniciar con acciones en el área de protección de suelos.
4. Recopilar información sobre prácticas de conservación de suelos, que están siendo implementadas en la zona cañera nacional, para elaborar un manual técnico sobre conservación de suelos adaptado a la zona cañera de Guatemala.
5. Fortalecer actividades del programa de manejo integrado de cuencas, como la evaluación de la calidad de semillas botánicas forestales para viveros en los que se están trabando.
6. Establecer una memoria de labores, en el tema de manejo integrado de las cuencas de los ríos María Linda, Achiguate, Acomé, Coyolate e Ixtacapa, definidas como prioritarias para el ICC, para que sirva de guía en la implementación en cuencas de la vertiente del Golfo de México y del Atlántico.
7. Realizar capacitaciones constantes al equipo en la temática del Manejo Integrado de Cuencas y Cambio Climático para estar actualizados.

## 1.8 BIBLIOGRAFIA

1. IARNA (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente, GT). 2006. Síntesis del perfil ambiental de Guatemala (en línea). Guatemala. Consultado 20 abr 2013. Disponible en [http://biblio3.url.edu.gt/IARNA/serie\\_amb/8.PDF](http://biblio3.url.edu.gt/IARNA/serie_amb/8.PDF)
2. ICC (Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático, GT). 2011a. Plan estratégico 2011-2020. Guatemala. 12 p.
3. \_\_\_\_\_. 2011b. Programas (en línea). Guatemala. Consultado 13 ene 2013. Disponible en <http://www.icc.org.gt/?PAGE=4>
4. \_\_\_\_\_. 2012. Informe de labores 2011. Guatemala. 44 p.
5. \_\_\_\_\_. 2013. Informe de labores 2012. Guatemala. 65 p.
6. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, CH). 2008. Cambio climático 2007: informe de síntesis. Suecia, Ginebra. 201 p.
7. Liere Quevedo, MA. 2012. Trabajo de graduación: estado de arte en información hidrometeorológica de las cuencas Coyolate, Acomé y Achiguate, en la vertiente del Pacífico, Guatemala, C.A. Tesis Inga. Agra. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 51 p.
8. World Vision, US. 2001. Manejo integrado de cuencas (en línea). US. Consultado 3 ene 2013. Disponible [http://biblioteca.catie.ac.cr/cursocuencas/documentos/Manual\\_de\\_Manejo\\_de\\_Cuencas\\_Vision\\_Mundial\\_mod.pdf](http://biblioteca.catie.ac.cr/cursocuencas/documentos/Manual_de_Manejo_de_Cuencas_Vision_Mundial_mod.pdf)

**2 CAPÍTULO II. ESTUDIO DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA PARTE ALTA DE LA ZONA CAÑERA, MICROCUENCA LOS SUJUYES, SANTA LUCÍA COTZUMALGUAPA, ESCUINTLA, GUATEMALA, C.A.**

**WATER EROSION STUDY IN THE UPPER PART OF THE AREA CANE, WATERSHED LOS SUJUYES, SANTA LUCÍA COTZUMALGUAPA, ESCUINTLA, GUATEMALA, CA.**

## 2.1 PRESENTACION

La erosión hídrica es un proceso erosivo típico de regiones tropicales, causado por la agresividad de la lluvia, debido a las características de intensidad, duración y frecuencia asociadas a los eventos pluviométricos. El efecto del agente causal, agua de lluvia, se magnifica cuando se conjugan otras variables, como la pendiente abrupta o escarpada de los terrenos, la usencia de cobertura vegetal y la condición textural, o el pobre desarrollo estructural de los suelos (Nuñez Solis 2001). En un informe del 2012 del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNED por sus siglas en inglés), se informó que los métodos actuales de la agricultura aceleran la erosión de los suelos; tales actividades pueden romper el equilibrio de la materia orgánica que se encuentra en éste, agotándose la cantidad de carbono que la tierra es capaz de almacenar, lo que produce que el carbono se convierta en dióxido de carbono, un gas de efecto invernadero que es el principal contribuyente al calentamiento global (Guioteca 2012).

Con excepción de algunos métodos específicos de control de erosión desarrollados en el pasado, tales como las terrazas o las curvas de nivel, muchos de los métodos usados para prevenir la erosión de suelo, están dirigidos a aumentar su estabilidad –de la cual la materia orgánica es uno de los principales factores- o a proteger la superficie del suelo con una cobertura vegetal, residuos de las plantas y otros. Tales métodos para prevenir la erosión de los suelos, también son apropiados para la captura del carbono, y viceversa. Por lo tanto, una disminución de la erosión podrá incrementar los efectos benéficos de los métodos de manejo y conservación de suelo (cobertura de suelo, labranza mínima, incremento de la materia orgánica). Por otro lado, el buen manejo del carbono del suelo ayudará a prevenir la erosión (FAO 2002). La agroindustria azucarera de Guatemala, específicamente los ingenios Pantaleón, La Unión, Madre Tierra, entre otros, están implementando prácticas de conservación de suelos para evitar la erosión de los mismos; actualmente en conjunto con el Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático –ICC-, se han realizado evaluaciones de acequias de ladera, en la microcuenca Los Sujuyes, como prácticas de conservación de suelos, las cuales han contribuido a la disminución de la velocidad de la escorrentía, aumentando el volumen de infiltración y a la retención de los suelos -115 T/Ha/año- (ICC 2012).

El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales informó en el 2009, que en Guatemala se han perdido 149 millones de toneladas métricas de suelo fértil (710 T/Ha/año), debido a las erosiones, siendo la Vertiente del Pacífico la más erosionada, ya que en esta se encuentra una alta actividad agrícola (MARN 2009).

La evaluación de las pérdidas de suelo, producto de la erosión hídrica, puede realizarse utilizando métodos directos como transeptos en cárcavas, clavos con roldanas, muestreo probabilístico y parcelas de escorrentía; como métodos indirectos, mediante la utilización de modelos como la ecuación universal de pérdida de suelo –EUPS- (Arana 1992).

Por lo anterior y como parte del Ejercicio Profesional Supervisado (EPS), de la Facultad de Agronomía, se desarrolló el estudio sobre la erosión hídrica en la parte alta de la zona cañera, microcuenca Los Sujuyes, Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla, Guatemala. El estudio se desarrolló en los meses de mayo a octubre (época lluviosa) de 2013, el objetivo de esta investigación fue estimar la cantidad de suelo perdido por procesos de erosión hídrica en la microcuenca Los Sujuyes, ubicada en la parte alta de la zona cañera, utilizando parcelas de escorrentía, distribuidas en diferentes ubicaciones y usos de la tierra (cultivo de caña de azúcar, plantación forestal de eucalipto y cultivo de hule). Los resultados obtenidos de las parcelas de escorrentía se validaron con la ecuación universal de pérdida del suelo modificada, EUPSM o MUSLE (por sus siglas en inglés), misma que fueron modelados utilizando un sistema de información geográfica.

Para la industria azucarera el desarrollo de esta investigación es estratégico, debido a que los datos obtenidos sobre la erosión del suelo y los factores que la controlan, servirán de base para sugerir prácticas de conservación de suelos que tiendan a la rehabilitación de otras áreas que estén dentro de la parte alta de la zona cañera, tanto bajo la cobertura de caña de azúcar como también coberturas forestales. Estas prácticas contribuirán a reducir la erosión, controlar las pérdidas de nutrientes de los suelos agrícolas, evitar la contaminación del recurso agua, reducir las tasas de sedimentación e inundaciones en las zonas bajas de las cuencas, reducir la emisión de dióxido de carbono y limitar los daños a los cultivos por derrumbes.

## 2.2 MARCO CONCEPTUAL

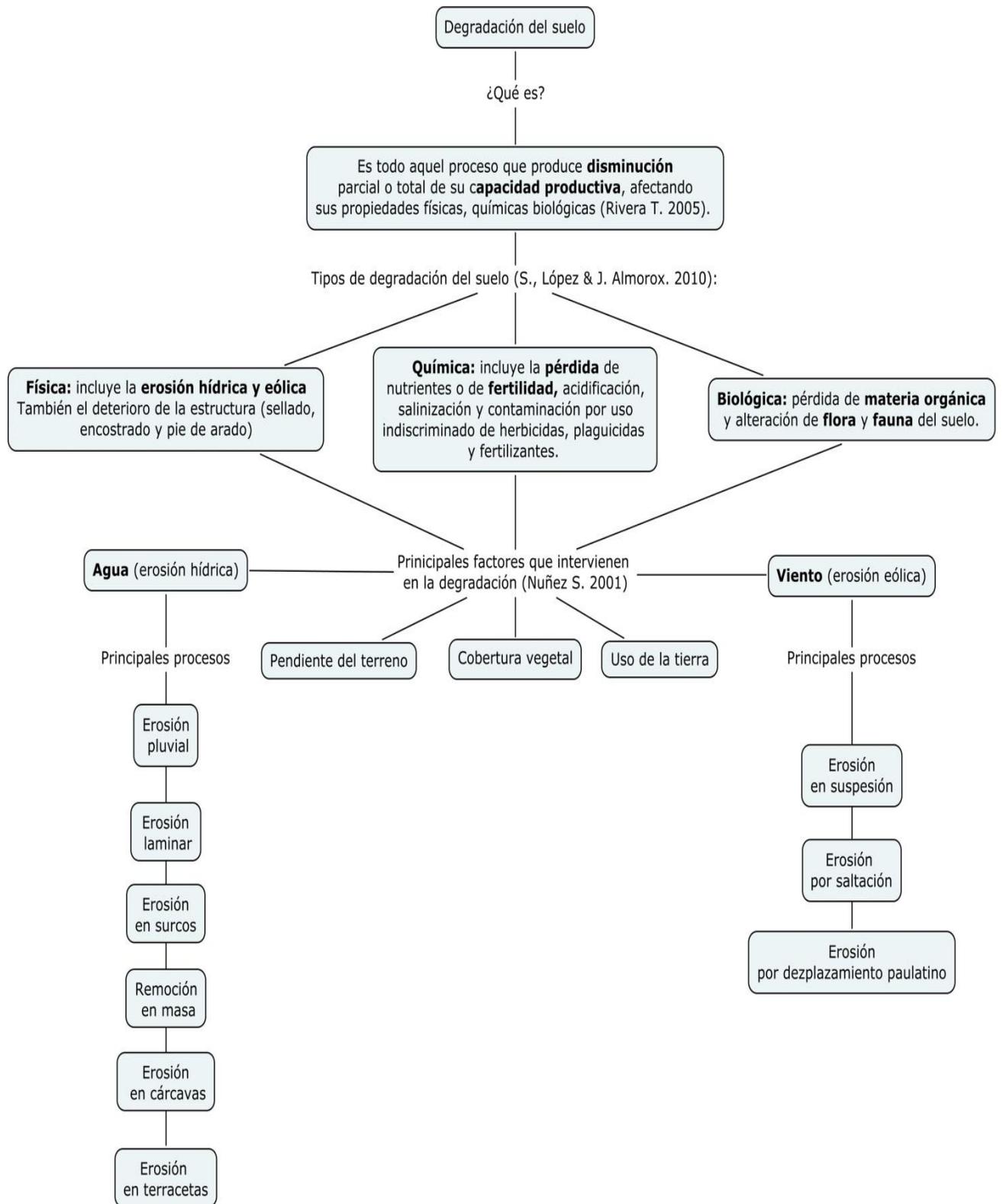
### 2.2.1 Degradación de los suelos

La degradación de los recursos naturales es un problema grave, que exige una atención prioritaria para el desarrollo sustentable de una nación. Con el ahondamiento de los problemas ecológicos, se ha multiplicado la importancia del aspecto ambiental, en los esfuerzos de la planeación económica (Rivera Trejo *et al* 2005).

La degradación ambiental, es un proceso inducido por el comportamiento de las actividades humanas, que daña o altera los recursos naturales y los ecosistemas. Los efectos potenciales son variables y pueden contribuir a incrementar la vulnerabilidad, frecuencia e intensidad de los peligros naturales. La degradación de los suelos, la deforestación, los incendios forestales, la desertificación, la pérdida de la biodiversidad, la contaminación del suelo, aire y agua, el cambio climático, el incremento en el nivel del mar y la reducción de la capa de ozono, son ejemplos de la degradación ambiental (Rivera Trejo *et al* 2005).

La degradación del suelo (figura 7), es todo aquel proceso que produce disminución parcial o total de su capacidad productiva o salud; afectando sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Rivera Trejo *et al* 2005). Existen diferentes factores que causan la degradación del suelo, todos ellos están interrelacionados, lo que dificulta su estudio, como por ejemplo: la erosión causada por el agua o el viento (Rafaelli *et al* 2010). Según la naturaleza de los procesos, se consideran tres tipos de degradación del suelo:

- 1) **Degradación física:** que incluye la erosión hídrica y eólica, y el deterioro de la estructura con fenómenos como el sellado, encostrado y la formación de pisos de arado.
- 2) **Degradación química:** se incluye la pérdida de nutrientes o de fertilidad, acidificación y alcalinización, salinización y contaminación por uso indiscriminado de herbicidas, plaguicidas y fertilizantes.
- 3) **Degradación biológica:** aquí se considera la pérdida de materia orgánica y la alteración de la flora y fauna del suelo (microflora, lombrices, ect.) (Rafaelli, López y Almorox 2010).



**Figura 7: Esquema general sobre la degradación de los suelos. Fuente: elaboración propia en base a Almorox (2010), Rivera Trejo *et al* (2005) y Núñez Solis (2001)**

## **A. Factores que intervienen en la degradación de los suelos**

Existen diferentes factores que causan la degradación del suelo, estando todos ellos interrelacionados, lo que dificulta su estudio. Uno de los más destacados, es la erosión causada por el agua o el viento, siendo un proceso que afecta de forma generalizada a la mayor parte de las tierras emergidas del mundo. El proceso erosivo es posible que se agrave por el cambio climático e incremente el deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas, y con ello, se acentúe la disminución de la materia orgánica, la contaminación y salinización. Asimismo, acelere la pérdida de biodiversidad y, en general, las propiedades económicas del suelo y la pérdida duradera de vegetación natural (Rafaelli, López y Almorox 2010).

### **2.2.2 Deterioro de las tierras en Guatemala**

Las condiciones topográficas, fisiográficas y climáticas de Guatemala han permitido el establecimiento de diversos ecosistemas, según World for Wildlife Fund (WWF 2001) citado por el IARNA (2009) en el país se encuentran 14 ecorregiones terrestres. Ésta diversidad de ecosistemas, representa disponibilidad de bienes naturales para el desarrollo de sistemas productivos y el asentamiento de comunidades. La utilización de estos recursos ha provocado diferentes grados de interacción entre la sociedad y la naturaleza y el uso del territorio (IARNA 2009).

Puesto que al utilizar las tierras más allá de sus capacidades se crean riesgos significativos de pérdida de suelo, el primer indicador que se discute, relacionado con el deterioro de las tierras, es la erosión potencial por sobreuso, un segundo indicador es el de las actividades productivas que potencialmente contribuyen a la erosión. Debido a que la erosión afecta los diferentes componentes del subsistema natural, se agrega como un tercer indicador, la erosión potencial en las ecorregiones del país (IARNA 2009).

El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales informó en el 2009, que en Guatemala se han perdido 149 millones de toneladas métricas de suelo fértil, debido a las erosiones; siendo la Vertiente del Pacífico la más erosionada, ya que en esta se encuentra una alta producción agrícola. La vertiente del pacífico está sujeta a un proceso de erosión más

acentuado (710 T/Ha/año), que la hace tener más del doble de la erosión que la vertiente del golfo de México (330 T/Ha/año) y casi seis veces más que la vertiente del Atlántico (122 T/Ha/año) (MARN 2009). La erosión potencial de la superficie en sobreuso (15%, según cuadro 4) es de 149 millones de toneladas de suelo al año, mientras que en las tierras bien utilizadas y en las subutilizadas la erosión es de 114 millones de toneladas de suelo. Esto quiere decir que el 15% del territorio que está en sobreuso puede ser el cuasante del casi el 57% de la erosión total del país en las tres categorías (IARNA 2009).

**Cuadro 4: Superficie de las categorías de intensidad de uso de la tierras, áreas urbanas y cuerpos de agua en Guatemala para el año 2003.**

Categoría	Área	
	Ha	%
Intensidad e uso de la tierra		
Uso correcto	5002262.00	46
Subuso	4021363.00	37
Sobreuso	1642403.00	15
Áreas urbanas	118289.00	1
Cuerpos de agua	104038.00	1
No determinada	545.00	0
Total	10888900.00	100

Fuente: IARNA, 2009

#### **A. Erosión potencial por actividades que se desarrollan en tierras sobreutilizadas**

En el cuadro 5 se presenta la erosión potencial por diferentes actividades que se realizan en tierras sobreutilizadas. Se puede observar que el uso que corresponde a la categoría de otros presenta la mayor erosión por superficie, con 260 T/Ha/año. Este valor se debe a que en esa categoría se encuentran el uso urbano, la extracción de arena, las playas y las cimas de volcanes, en donde no existe cobertura vegetal. El segundo valor corresponde a los cultivos anuales con 102 T/Ha/año que, al mismo tiempo, representa más de 60% de área en sobreuso, lo cual hace que esta actividad contribuya con casi el 69% de la erosión total por sobreuso. Le siguen los pastos, con 74 T/Ha/año, que ocupan el tercer lugar en porcentaje de erosión total, con casi 6%.

Posteriormente están los cultivos perennes con 70 T/Ha/año pero, por tener mayor área en sobreuso que los pasto, ocupan el segundo lugar en el porcentaje de erosión total, con casi el 24%. Por último están las plantaciones forestales con 5 T/Ha/año y menos del 0.01% de la erosión total (IARNA 2009).

**Cuadro 5: erosión potencial por actividades que se desarrollan en tierras sobreutilizadas**

Uso	Área (Ha)	T/Ha/año	Total (T)	% del total de erosión
Cultivos anuales	1009527.00	102	102122916	68.87
Cultivos perennes	505533.00	70	35159000	23.59
Otros	10439.00	260	2719182	1.82
Pastos	115785.00	74	8513620	5.71
Plantaciones forestales para producción	1119.00	5	5255	0.01
Total	1642403	91.11a/	148519973	100

a/ promedio ponderado de todos los usos

Fuente: IARNA, 2009

### 2.2.3 Erosión del suelo

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 y el viento. Cuando la energía de estos agentes no es suficiente para transportar las partículas, se produce una tercera fase: su deposición (Morgan 1997). La erosión de los suelos tiene, desde el punto de vista de las ciencias de la Tierra, un aspecto positivo al llevar a los ríos sedimentos y nutrientes, manteniendo de esta forma el necesario equilibrio sedimentario en los cauces y en las playas, a la vez que configura y mantiene espacios muy fértiles. La erosión está originada por la combinación de varios factores, tales como las pendientes pronunciadas, el clima, las características del suelo, su uso y gestión, el tipo y estado de cubierta vegetal (Rafaelli, López y Almorox 2010).

En todo el mundo, el uso agrícola de la tierra está causando graves pérdidas de suelo. Es muy probable, que la raza humana no pueda alimentar una población creciente, si la pérdida de suelos fértiles por el uso agrícola continua con esta tendencia. Las causas del uso inadecuado de la tierra son múltiples (FAO 1997). Como consecuencia, la degradación de tierras implica importantes cambios socioeconómicos: desequilibrios en los rendimientos y producción de los agrosistemas, disminución o pérdida de ingresos económicos, ruptura del equilibrio tradicional entre las actividades agrícolas y de pastoreo, abandono de tierras y cultivos, deterioro del patrimonio paisajístico, emigración, etc. (Rafaelli, López y Almorox 2010). En muchos países en desarrollo, el hambre obliga a la gente a cultivar tierras que no son aptas para agricultura o que sólo con esfuerzos muy grandes y costosos, como la construcción de terrazas, pueden ser convertidas en áreas para uso agrícola (FAO 2000).

La erosión se transforma así en una amenaza directa al agricultor. Se desarrollan sistemas y prácticas para controlar la erosión con el fin de conservar el suelo, es decir, para evitar que el suelo se moviera de un lugar a otro. Evidencias de esta idea de conservación de suelo con respecto a la erosión hídrica eran cultivos en curva de nivel, camellones o zanjales también en curvas de nivel para evitar que el agua corriera en las pendientes. Se hicieron grandes esfuerzos para construir terrazas. Además se recomendó no dejar la superficie del suelo descubierto, dejar rastrojos o alguna capa de cobertura en la superficie para frenar tanto la energía cinética tanto del viento como del agua (FAO 2000).

### **A. Agentes erosivos**

Los principales factores que contribuyen para que se presenten los procesos erosivos en los suelos son:

- **El agua de lluvia y sus características hidrodinámicas asociadas:** como el tamaño de la gota de lluvia y la velocidad de caída terminal, al impactar en el suelo, especialmente aquel que carece de cobertura vegetal, según Hudson, citado por Núñez (2001).

También influyen las características de intensidad, o cantidad de milímetros de lluvia caída por unidad de tiempo: el tiempo que dura el evento pluvial desde que se inicia hasta que concluye, y la frecuencia o regularidad con la que se presenta un

evento pluvial en una región particular, o número de veces que se repite una tormenta con características similares en intensidad y duración durante un largo período de registro: 10, 20, 50 o más años (Núñez Solís 2001).

- **La pendiente de los terrenos medida en porcentaje:** equivale a la tangente del ángulo de la pendiente. Estas medidas permiten calificarlos en terrenos planos, ligeramente ondulados, moderadamente ondulados, ondulados, etc. En la medida en que se incrementa el ángulo de la pendiente, así como su longitud y su conformación fisiográfica (pendientes simples y complejas), se incrementa la susceptibilidad de las partículas finas del suelo de ser arrastradas por el agua de lluvia, en forma laminar (Núñez Solís 2001).
- **La ausencia de vegetación en los terrenos (cobertura vegetal):** favorece el impacto directo de las gotas de lluvia en los suelos, acelerando los procesos erosivos por salpique de agua de lluvia y por escorrentía laminar (Núñez Solís 2001).
- **La condición textural del suelo y su desarrollo estructural:** los suelos en los que predomina gran cantidad de partículas finas como limos y arcillas, calificados sobre su base porcentual como franco arcillo limosos, franco arcillosos y franco limosos, son más susceptibles a la erosión hídrica por el impacto de gotas de lluvia que los suelos de texturas gruesas como los arenoso francos o los franco arenosos. A su vez, el desarrollo estructural del suelo ayuda a evitar los procesos erosivos. Si un suelo tiene un buen desarrollo estructural, tiene espacios porosos y grietas que favorecen la penetración del agua de lluvia o del agua de riego por aspersion, en forma vertical descendente (infiltración), y se evita parcialmente el arrastre de las partículas del suelo por erosión laminar hídrica. Pero la compactación de suelos y el deterioro estructural asociado, contribuyen a que se presenten los procesos erosivos (Núñez Solís 2001).
- **El uso de la tierra:** algunos cultivos hortícolas favorecen los procesos erosivos. Por ejemplo, las parcelas donde se siembra cebolla requieren que se elimine la cobertura vegetal, para un mejor control fitosanitario de los cultivos. Este sistema de uso de la tierra deja la parte superior del suelo desprovista de la protección que brinda la cobertura vegetal. La capa superior del suelo se convierte en sujeto pasivo

de los procesos ligados a los parámetros de agresividad de las lluvias, que causan erosión (Núñez Solís 2001).

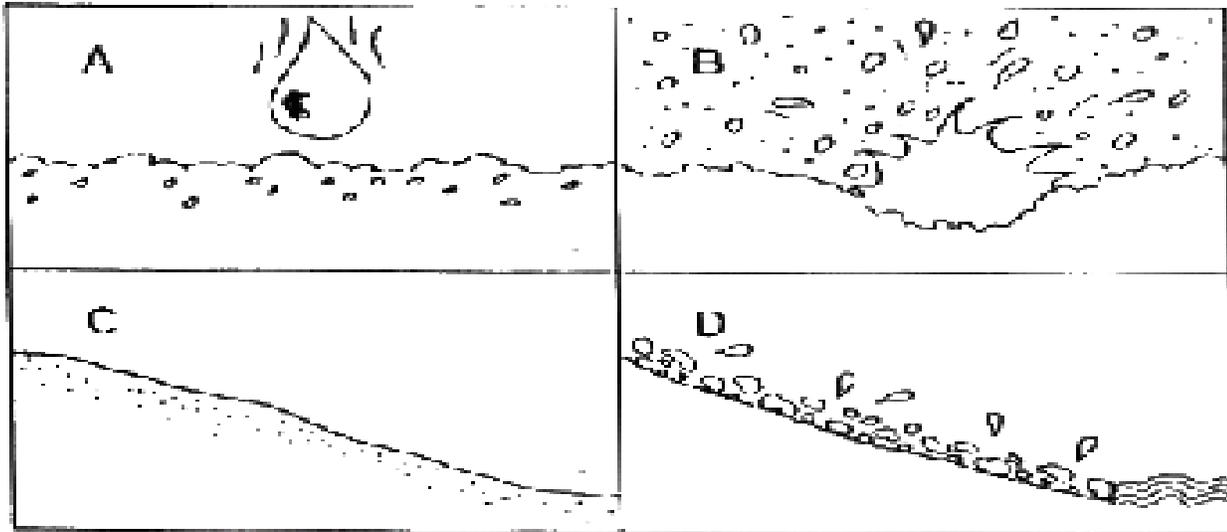
### **B. Erosión hídrica**

La erosión hídrica es uno de los procesos de degradación más importantes, que afectan la capacidad de las tierras en pendiente, para la producción de alimentos para el consumo humano o animal; además, la presencia de las plantas y las primeras capas del suelo son imprescindibles para que el agua de las precipitaciones se infiltre, por lo que el aumento en la erosión significa siempre una disminución en la recarga de los acuíferos. Esta erosión hídrica, es un proceso erosivo típico de regiones tropicales, causado por la agresividad de la lluvia, debido a las características de intensidad, duración y frecuencia asociadas a los eventos pluviométricos (Nuñez Solís 2001).

La lluvia y el escurrimiento superficial, son los agentes responsables del desprendimiento y movimiento de las partículas de suelo sobre la superficie terrestre. El riesgo de erosión por acción del agua es máximo en periodos de lluvias intensas, en que el suelo se encuentra saturado, con escasa cubierta vegetal, por lo que aumenta el movimiento del agua por la superficie del suelo. El efecto de la esorrentía resultante, elimina cantidades importantes de suelo. La erosión hídrica es casi siempre debida a la disminución de la cubierta vegetal del suelo, por el sobrepastoreo de ovinos o a causa de la eliminación de la vegetación para usos domésticos o agrícolas (Rivera Trejo *et al* 2005) La erosión provoca un aumento de la carga sólida que arrastran los ríos, disminuyendo sustancialmente la capacidad útil de algunos aprovechamientos hidráulicos. Asimismo, la carga sólida de los ríos, enturbian las aguas costeras de las zonas donde desembocan. Esta agua deja de ser útil para la pesca, ya que los peces emigran al cambiar las condiciones de su ecosistema y estas zonas, pierden el atractivo turístico que pueden tener.

La erosión se produce por dos mecanismos. El primero es por el impacto directo de la gota de lluvia sobre la superficie del suelo (figura 8A y 8B), que produce la destrucción de los agregados o terrones del suelo cuando éste está desnudo, el material fino separado tapa los poros del suelo y entonces el agua empieza a escurrir por la superficie; es decir, que al

separarse en sus componentes elementales, el suelo queda impermeabilizado; por un lado se torna imposible que el agua se infiltre para alimentar a las plantas, mientras que por otro lado, el suelo se sigue deslavando (Rivera Trejo *et al* 2005) El segundo mecanismo, es cuando el agua escurre sobre la superficie del suelo, debido a la pendiente y arrastra partículas del mismo, materia orgánica y nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo, entre otros (Escalante 2005).



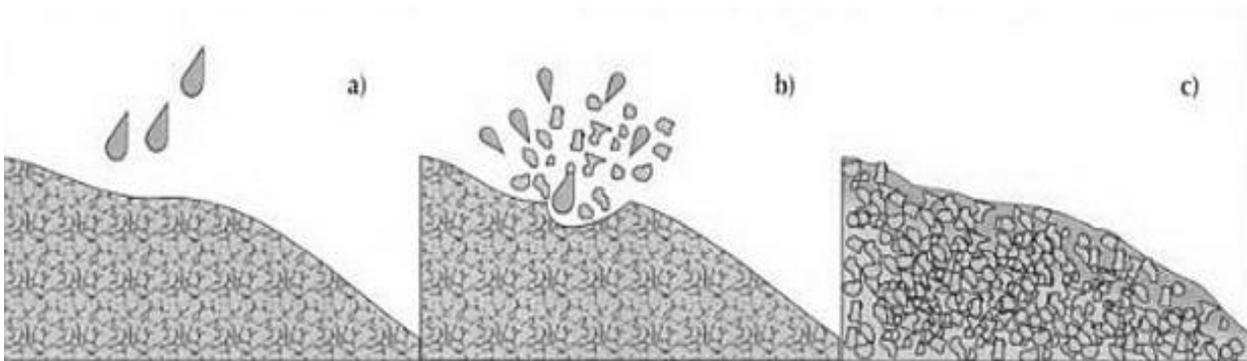
**Figura 8: Erosión Hídrica. A) gota de agua impactando en el suelo desnudo. B) Salpicadura de partículas de suelo. C) suelo vulnerable a la erosión por su pendiente y D) Partículas de suelo llevadas por la escorrentía formada por la precipitación y pendiente.**

De acuerdo con la intensidad de lluvia, tipo de suelo y grado de protección de la superficie se producirá erosión hídrica de distinta gravedad. Así se encontrará erosión laminar, donde el suelo se pierde en capas muy delgadas. Luego puede aparecer la erosión digital, en forma de los dedos de una mano, donde el agua que escurre desde las lomas más altas a los bajos es capaz de cortar el suelo y formar pequeños surcos de menos de 5 a 10 cm de profundidad. Por último, la forma más grave de erosión lo constituye la formación de surcos y canales profundos, llamados cárcavas. Estas cárcavas pueden tener varios metros de ancho y de profundidad, constituyendo pequeños arroyos (Escalante 2005).

La situación crítica desde el punto de vista de la erosión, lo constituyen los suelos pobres en materia orgánica y con mal estructura, cuando son sometidos a lluvias intensas o cuando están desnudos o con muy escasa protección vegetal. La pendiente del terreno es un factor muy importante en la erosión y con valores mayores al 1%, se tienen pérdidas considerables de suelo. Según Núñez (2001), los procesos de la erosión hídrica se clasifican en: erosión pluvial o por salpique, la erosión laminar, la erosión en surcos, la erosión en cárcavas y la erosión en terracetos. Todos los procesos (excepto la erosión pluvial y en terracetos), ocurren debido al flujo del agua en la superficie de los terrenos. Estos procesos están influenciados por diferentes variaciones en textura, estructura y contenido de materia orgánica del suelo; además de la influencia de la pendiente y las condiciones climáticas. Entre ellas, destaca la agresividad de la lluvia, sumado al manejo de los suelos y al grado de cobertura vegetal. También se describe la remoción en masa, que se subdivide en solifluxión, deslizamiento y derrumbes, coladas de barro o golpes de cuchara, hundimientos, y desprendimientos o desplomes. La mayoría de estos procesos ocurren por la saturación hídrica de los suelos, en su gran mayoría asociada a procesos geológicos, geomorfológicos y climáticos. Otros se encuentran ligados a las construcciones de caminos, carreteras, minas, excavación de tajos y flujos de agua subterránea. Los procesos de erosión hídrica de mayor importancia son los siguientes (Núñez Solís 2001):

- **Erosión pluvial:** Esta forma de erosión, es consecuencia directa del impacto de las gotas de lluvia en el suelo sin cobertura vegetal (figura 9a). Las gotas de lluvia desprenden las partículas del suelo, gracias a la energía cinética asociada a ellas. La erosión pluvial se identifica en el campo, porque el envés de las hojas bajas de los cultivos, tiene adherida (en formas agrupadas) pequeñas partículas de suelo que se pueden definir como grumos, ya que inicialmente es una mezcla viscosa de agua y coloides, que al deshidratarse, se adhieren firmemente al envés de la superficie foliar. Otra forma de identificar el proceso de erosión pluvial es la formación de pedestales. Así, los fragmentos de gravillas y pequeñas astillas de madera o fragmentos de ramas de árboles, protegen el suelo situado en su parte inferior, generando una típica formación de pedestales, con un patrón visual que presenta una base angosta y una cornisa en la parte superior (Núñez Solís 2001).

- **Erosión laminar:** Es el arrastre de partículas de suelo suspendidas en el agua de lluvia, que se desplaza en sentido de la pendiente (figura 9c). El traslado de las partículas del suelo puede ocurrir en forma difusa o uniforme. Cuando ocurre en forma difusa, se considera como un tipo de erosión poco perceptible. Sin embargo, una inspección cuidadosa en el campo, revela que los residuos de cosecha se encuentran orientados en el sentido de escurrimiento del agua de lluvia, o en el sentido de la pendiente, si los terrenos están situados en áreas de laderas. Además, las pequeñas raíces absorbentes de plantas agrícolas, arbustos y árboles quedan expuestas en la superficie del suelo (Núñez Solís 2001).
- **Erosión en surcos:** Este proceso erosivo se debe al escurrimiento o flujo concentrado del agua, incluso en terrenos ligeramente ondulados, con 3 a 8 por ciento de pendiente. El agua que escurre por la superficie de los terrenos, es el mecanismo de transporte de las partículas de suelo, que fluyen mezclados heterogéneamente y concentran su flujo, a lo largo de pequeñas depresiones del terreno. Por esta razón, la característica de los surcos es su paralelismo en el sentido de la pendiente. El proceso de erosión en surcos es más activo en condiciones de suelo desnudo y con texturas finas, francos arcillosos, franco limosos y arcillosos, y menos activos en suelos de texturas gruesas (Núñez Solís 2001).



**Figura 9: Erosión Pluvial (a), b) erosión por salpique y c) erosión laminar. Fuente: Núñez (2001)**

- **Erosión en cárcavas:** Es una de las formas de mayor espectacularidad en el proceso erosivo, por las dimensiones que puede alcanzar tanto en longitud como en profundidad, y el volumen de suelo que se pierde. La erosión en cárcavas, es el proceso que sigue normalmente al proceso de erosión en surcos, o procesos combinados de erosión en surcos y en terracetas (Núñez Solís 2001).  
Se produce por la fuerte concentración del agua de escurrimiento, en las depresiones de ladera, aunque a veces presenta en áreas planas.
- **Erosión en terracetas:** Es causada por el ganado vacuno que camina en terrenos de ladera. Cuando el ganado es apacentado en estos terrenos, camina en forma intuitiva, siguiendo curvas de nivel. El paso continuo del ganado, sumado a su peso ejercido en el área de desplazamiento por las pezuñas, produce una compactación y genera un modelo erosivo en forma trapezoidal invertida, de diversos tamaños (Núñez Solís 2001).
- **Remoción en masa:** El agua ingresa por los poros del suelo, lo satura y causa que el volumen de suelo que ha recibido el agua por infiltración se desplace pendiente abajo, por influencia de la gravedad. Las formas más comunes de remoción en masa son: **Solifluxión:** es un movimiento progresivo y lento de los suelos, que alcanzan en forma intermitente el límite líquido. Este límite líquido es un estado de consistencia del suelo, que fluye ante presiones mínimas, debido a que está sobresaturado con el agua, que ingresó al sistema poroso del suelo por flujos hídricos que ingresan por gravedad o flujo subsuperficial, a las regiones afectadas por solifluxión. **Colados de barro:** son desplazamientos de suelo heterogéneamente mezclados con agua, árboles y raíces, que fluyen rápidamente por las laderas, en forma de mezclas de lodo. **Deslizamientos y derrumbes:** remoción en masa, que es una mezcla heterogénea de ambos (Núñez Solís 2001).

### C. Erosión por escurrimiento

Cuando el agua de lluvia no alcanza a infiltrarse en el suelo, debido a su saturación, pendiente elevada o poca capacidad de infiltración, fluye por la superficie de terrenos pendientes arrastrando el suelo desprendido. Según el grado de pendiente, cantidad de agua, clase y estado del suelo, se presentan diferentes formas de erosión por escurrimiento, así (Prieto Bolívar 2004):

- **Forma difusa:** Consiste en desplazamientos cortos de pequeñas partículas, o en la formación de surquillos temporales, aún en terrenos con buena cobertura vegetal (Prieto Bolivar 2004).
- **Forma laminar:** o arrastre uniforme y casi imperceptible de delgadas capas de suelo por mantos de agua. Esta forma de erosión es una de las más peligrosas o traicioneras, ya que se vienen a notar cuando sólo queda una capa muy delgada del suelo, las raíces de las plantas se ven desnudas o aparece el subsuelo (Prieto Bolivar 2004).
- **Forma de surcos.** Esta es causada por el escurrimiento concentrado de agua en surcos más o menos paralelos, independientes y durables. La formación de surcos es frecuente en suelos susceptibles a la erosión o donde se hacen cultivos en sentido de la pendiente (Prieto Bolivar 2004).
- **Forma de calva.** Esta es causada por el paso continuo de animales, personas o máquinas, las cuales destruyen la cobertura vegetal y por compresión compactan el suelo, para originar por allí, según el grado de pendiente, las otras formas de erosión (Prieto Bolivar 2004).
- **Forma de zanjas o zanjones (cárcavas):** debido a una mayor concentración en el escurriendo, y a las irregularidades o susceptibilidades del terreno, varios surcos pueden unirse o ahondarse y formar zanjones o zanjas (cárcavas) (Prieto Bolivar 2004).
- **Forma agresiva:** esta forma es debida al desquiciamiento de las paredes de zanjones o derrumbes, por la concentración de aguas que escurren por las paredes o por su base, produciendo el socavamiento. De esta manera se aumenta la longitud y tamaño de los zanjones, llegando en ocasiones a la cima de las laderas (Prieto Bolivar 2004).

#### **D. Erosión eólica**

El factor principal en la erosión eólica, es la velocidad del aire. A causa de la rugosidad del terreno, las piedras, la vegetación y otros obstáculos, la velocidad del viento es mínima cerca de la superficie del suelo. Es el proceso de disgregación y transporte del suelo por la

acción del viento (figura 10). Este es favorecido por los vientos fuertes y frecuentes, así como las superficies llanas que están expuestas al viento; otra de las características que favorecen la erosión eólica es el suelo seco, suelo con textura fina y poca materia orgánica, una condición árida y con poca vegetación (Rafaelli, López y Almorox 2010). Esta condición eólico-dinámica hace que el viento desprenda las partículas finas del suelo como arenas gruesas, medianas y muy finas, además de limos y arcillas, y las transporte por mecanismos de suspensión, saltación y deslizamientos paulatinos (Nuñez Solís 2001).



**Figura 10: Erosión eólica causada por el viento en áreas desérticas.**

- **En suspensión:** Las partículas finas (menores de 0.1 milímetros de diámetro) permanecen en la atmósfera, que tiene una capacidad estimada de acarreo de tales partículas de hasta 15 toneladas de suelo por kilómetro cúbico de atmósfera. Estas partículas sedimentan o se acumulan en los sitios hacia los que fueron transportadas, por la dirección predominante del viento, cuando dentro de sus torbellinos eólicos la fuerza de gravedad es mayor que las fuerzas que mantienen las partículas en suspensión (Núñez Solís 2001).
- **Por saltación:** Es un desplazamiento de partículas finas, con tamaños entre 0.1 a 0.5 milímetros de diámetro, que ocurre en trechos muy cortos (Núñez Solís 2001).

- **Por desplazamiento paulatino:** Es el modelo de transporte más lento, que corresponde a las partículas entre 0.5 y 2 milímetros de diámetro. Esto incluye básicamente las arenas de tamaño mediano y grueso. Estas partículas gruesas se mueven lentamente, a ras de la superficie del suelo (Núñez Solís 2001).

Los tres mecanismos de erosión eólica ocurren en forma simultánea a alturas menores de un metro.

### **E. Principios para generar los lineamientos básicos**

Existen nueve principios generales que se deberían considerar como lineamientos básicos para desarrollar estrategias sobre los sistemas de manejo de suelos (FAO 2000).

- **Aumentar la cobertura de la tierra.** Es el principio más importante en el manejo sostenible de suelos porque conlleva múltiples beneficios.
- **Aumentar la materia orgánica del suelo.** Este principio está estrechamente relacionado con el principio anterior de aumentar la cobertura, porque al incrementar la cobertura del suelo con materiales orgánicos, se incrementa el contenido de materia orgánica de los horizontes más superficiales. Es más difícil aumentar el contenido de materia orgánica de los horizontes inferiores, especialmente de los horizontes de subsuelo.
- **Aumentar la infiltración y la retención de humedad.** Los efectos beneficiosos de aumentar la infiltración y la retención de humedad de los suelos son:
  - a. Disminuir el déficit de humedad en los cultivos.
  - b. Incrementar el rendimiento y la producción de biomasa del cultivo.
  - c. Reducir la escorrentía.
- **Reducir la escorrentía.** Los efectos beneficiosos de la reducción de la escorrentía son:
  - a. Reducir la pérdida de suelo, agua, nutrientes, fertilizantes y pesticidas; esto resulta en menor erosión de la parcela y menor contaminación ambiental aguas abajo.
  - b. Aumentar el agua disponible para el cultivo, y con ello la producción de grano y de biomasa.

- **Mejorar las condiciones de enraizamiento.** Los efectos beneficiosos producidos por la mejora en las condiciones de enraizamiento son:
  - a. Mejorar el desarrollo y crecimiento de las raíces, a través de la absorción de nutrientes y agua por las plantas.
  - b. Reducir las probabilidades de que los cultivos sufran una sequía.
- **Mejorar la fertilidad química y la productividad.** Los efectos beneficiosos causados por la mejora de la fertilidad química y la productividad de los suelos son:
  - a. Incrementar la producción del rendimiento.
  - b. Incrementar la producción de la biomasa del cultivo. Mayores producciones de follaje y de raíces del cultivo darán más residuos, y por lo tanto una mayor cobertura al suelo y una devolución mayor de materia orgánica al mismo.
- **Reducir los costos de producción.** Los efectos positivos de las reducciones en los costos de producción son:
  - b. Incremento en la rentabilidad neta.
  - c. Sistemas de producción más sostenibles.
- **Proteger las parcelas.** Se deben proteger las parcelas de los efectos de las inundaciones, la erosión hídrica, los vientos fuertes, la erosión eólica, y los deslizamientos de tierra. Los vientos fuertes pueden provocar no solamente problemas de erosión eólica sino también problemas en la aplicación oportuna de los herbicidas e insecticidas.
- **Reducir la contaminación del suelo y del ambiente.** Los principios para reducir la contaminación de los suelos y del ambiente son:
  - a. Aplicar el manejo integrado de plagas y de malezas en lugar de usar pesticidas; remplazar en lo posible el uso de pesticidas tóxicos con pesticidas no tóxicos, o preferentemente con pesticidas biológicos o botánicos.
  - b. Capacitar a los agricultores sobre la forma correcta de manejar los compuestos químicos para uso agrícola.

- c. Aplicar los fertilizantes en forma fraccionada según las necesidades del cultivo y la capacidad de retención de nutrimentos del suelo, para evitar la pérdida de estos en las aguas superficiales y subterráneas.

#### **2.2.4 Erosión de suelos y el cambio climático**

Se estima que la cantidad de carbono orgánico en los suelos es cuatro veces superior a la cantidad de carbono orgánico de la vegetación terrestre y unas tres veces superior al carbono orgánico de la atmósfera (Almorox 2010). Es por esto que se consideran a los suelos agrícolas como uno de los mayores depósitos de carbono del planeta y tienen potencial para expandir el secuestro de carbono y de esta manera mitigar el crecimiento de la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub>. Dentro del contexto del protocolo de Kyoto y las subsiguientes discusiones de la Conferencia de la Partes (COP), hay un cierto número de características que hacen que el secuestro de carbono en las tierras agrícolas y forestales pueda ofrecer posibilidades de estrategias atractivas de modo de mitigar el incremento en la atmósfera de las concentraciones de gases de invernadero (FAO 2002).

A parte de los factores climáticos –principalmente la temperatura- los procesos más importantes que causan pérdidas de carbono del suelo son la erosión y la mineralización de la materia orgánica. La lixiviación del carbono orgánico e inorgánico, es otro mecanismo importante de pérdida de carbono en el suelo (FAO 2002).

El control de la erosión de los suelos es otra forma de reducir emisiones de dióxido de carbono desde los suelos. Es un hecho conocido que la erosión actúa arrastrando selectivamente las fracciones más finas (arcilla) del suelo, y también es sabido que la materia orgánica está fuertemente asociada a estas partículas más finas. Los sedimentos enriquecidos en carbono son redistribuidos dentro de la toposecuencia o terminan en corrientes de agua superficiales, en donde la materia orgánica es atacada por microorganismos resultando en liberación de CO<sub>2</sub>. Greogorchi *et al*, 1998, citado por PROCISUR, 2001, concluyeron que la adopción de prácticas que prevengan la erosión puede ser la mejor estrategia a nivel global, para mantener y aun incrementar las cantidades de carbono almacenadas en los suelos (PROCISUR 2001).

### **2.2.5 Métodos de estimación de la erosión hídrica**

Los datos sobre la erosión del suelo y los factores que la controlan, pueden tomarse en campo o para condiciones de simulación, en laboratorio. La utilización de datos de campo o de laboratorio depende de los objetivos. Para conseguir datos reales de pérdidas de suelo, las medidas de campo son las más fiables, pero como las condiciones varían temporal y espacialmente, es a menudo difícil determinar con ellas, las causas principales de la erosión o conocer los procesos que actúan. Los experimentos diseñados para obtener una explicación, son mejor interpretados en el laboratorio, donde se pueden controlar los efectos de muchos factores. Sin embargo, a causa de lo artificioso de los experimentos de laboratorio, es deseable alguna confirmación de sus resultados en el campo (Morgan 1997).

Los experimentos se realizan, generalmente, para evaluar la influencia de uno o más factores en la tasa de erosión.

#### **A. Métodos cualitativos**

Los métodos cualitativos de estimación de la erosión hídrica, no recurren a valoraciones numéricas-cuantitativas del fenómeno natural, sino adjetivaciones ordinales de los diferentes caracteres que se toman en consideración. Entre los métodos cualitativos, destaca la cartografía de unidades homogéneas, en función de los parámetros principales que controlan el proceso erosivo (erosividad, suelo, vegetación, topografía), y la atribución de valores de cuantificación más o menos subjetivos. Los estados de la erosión real pueden ser determinados mediante la observación con sensores remotos y contrastes de campo. Esta técnica puede ser utilizada para la cartografía de áreas con erosión entre arroyos y arroyos, cárcavas, abarrancamientos y desplazamientos en masa, de forma que, después de la valoración de los estados de erosión, se puede confeccionar el mapa cualitativo de erosión hídrica (Rafaelli, López y Almorox 2010).

##### **a. Modelo cualitativo de erosión-deposición**

El modelo cualitativo de erosión-deposición para suelos cultivados, se apoya en el principio de que la erosión es más activa que la edafización, lo que provoca la

desaparición de los horizontes superficiales del perfil, en la parte alta de las laderas y su acumulación, al menos parcial, en la base (Rafaelli, López y Almorox 2010).

De acuerdo con el modelo, en las tierras cultivadas la erosión se manifiesta en arroyos y zonas de acumulación. Los rasgos erosivos no son permanentes, pues con la siguiente labor se anulan los efectos de la erosión. El laboreo va mezclando los horizontes superficiales y profundos, según van siendo erosionados los primeros y como consecuencia, el proceso erosivo se traduce en una remoción superficial uniforme asimilable a la erosión laminar/entre-arroyos (Rafaelli, López y Almorox 2010).

El efecto es el truncamiento de los suelos cultivados en la parte alta de la ladera y su acumulación, al menos parcial, en la base; siendo el proceso más acusado cuando mayor es la pendiente. La evidencia de la misma aparece reflejada, incluso en las zonas actualmente llanas, por un vistoso mosaico de colores. La distribución de las zonas de erosión y acumulación es tremendamente intrincada, pero es posible su cartografiado detallado por medio de sensores remotos. La generalización a las zonas no cultivadas es más difícil, se puede realizar considerando tanto la cobertura vegetal como las formas de erosión que puedan aparecer. (Rafaelli, López y Almorox 2010).

El método de los sensores remotos presenta cierto grado de subjetividad e incertidumbre, al basarse el análisis de las fotografías e imágenes digitales, en el estudio de la intensidad de los colores, y ser éstos el resultado de una serie de factores dispares entre sí, como pueden ser los puramente técnicos, meteorológicos, humanos, época del año y litología. Por lo que el estudio de las imágenes, ha de ser completado ineludiblemente con el trabajo de campo, y nunca se ha de considerar como un sustituto. De forma que después de una primera interpretación, delimitando unidades y realizando las anotaciones oportunas, es necesario realizar una comprobación en el campo para constatar que el análisis responde a la realidad (Rafaelli, López y Almorox 2010).

El método también puede realizarse tomando en consideración el análisis y delimitación "in situ" de evidencias de erosión, así se puede analizar la presencia de montículos o pedestales de erosión. Estas microtopografías son muy frecuentes en ambientes áridos y

semiáridos, originándose debido a la protección horizontal que pueden ejercer las plantas, costras o pedregosidad, frente a la erosión que se produce en el suelo desnudo. La medida de las diferencias de niveles entre superficies erosionadas y protegidas permite la estimación de la tasa de erosión (Rafaelli, López y Almorox 2010).

## **B. Métodos cuantitativos**

Los métodos cuantitativos permiten la estimación numérica de la erosión. No sólo dan un valor de pérdidas de suelo estimadas; sino también mediante rangos cuantitativos, se pueden establecer diferentes grados erosivos, por lo que el método cuantitativo puede ser empleado para el desarrollo de metodologías cualitativas. La cuantificación se realiza a diferentes escalas desde el nivel de pedón, de parcela, ladera o cuenca (Rafaelli, López y Almorox 2010).

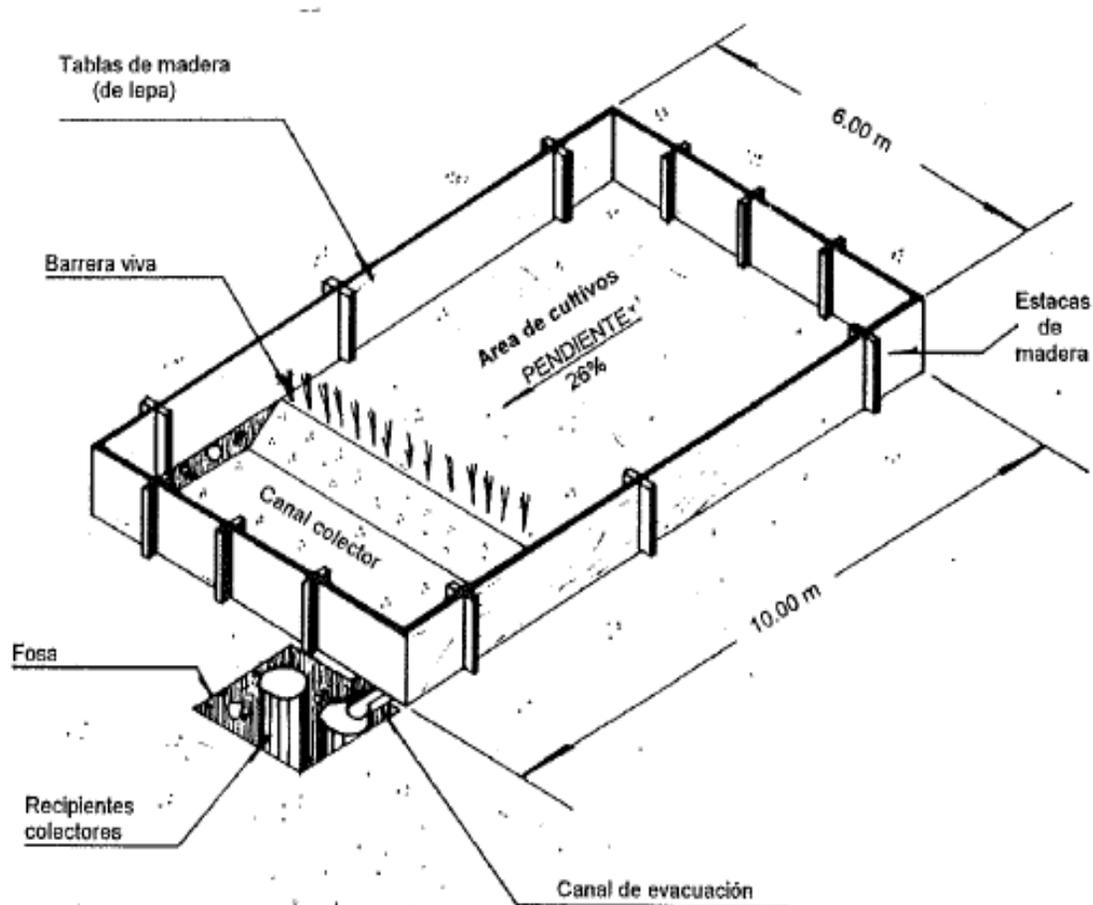
### **a. Evaluación directa**

Las medidas de campo pueden clasificarse en dos grupos: las diseñadas para determinar las pérdidas de suelo en áreas relativamente pequeñas o parcelas de erosión, frecuentemente como parte de un experimento, y las diseñadas para evaluar la erosión en áreas más grandes, como una cuenca hidrográfica (Morgan 1997). Los métodos cuantitativos determinan la erosión por medida directa (medidas en cuencas, medida del volumen del flujo de agua y sedimentos, agujas de erosión, estacas, varillas, perfiladores micro topográficos, etc.), en el terreno o la estimación a partir de ensayos (simuladores de lluvias, parcelas de erosión), o por medida de parámetros asociados a los sedimentos o al suelo (materia orgánica, fósforo, etc.) (Rafaelli, López y Almorox 2010).

#### **i. Parcelas de erosión**

Las parcelas delimitadas se emplean en investigaciones permanentes o en estaciones experimentales, para estudiar los factores que afectan a la erosión, ya que se pueden controlar las condiciones en cada parcela. Cada parcela es una porción aislada de terreno que tiene como datos conocidos: tamaño, grado de pendiente, longitud de la pendiente y tipo de suelo, para el que se ha controlado su escorrentía y pérdida de suelo. El número de parcelas depende, sobre todo, de los propósitos del experimento, pero normalmente deben permitir, al menos dos repeticiones (Rafaelli, López y Almorox 2010). La parcela de

medición generalmente está compuesta de un área de escurrimiento con bordes y un recipiente de captación (figura 11). Los bordes divisores de las parcelas, pueden ser de lámina de plycem o de zinc, enterrados 20 a 30 cm y con una altura de 20 cm sobre el suelo. El recipiente puede ser un medio barril o cualquier tanque que se adapte al tamaño necesario, para captar el sedimento proveniente de la parcela (CIAT, PASALAC y UNA 2005).



**Figura 11: Esquema de una parcela de escurrimiento. Fuente: Salguil (1995)**

Las dimensiones de la parcela pueden variar según las áreas fisiográficas de la microcuenca, pero se han utilizado parcelas de 8 m de ancho por 15 m de largo (Vallejos y Velásquez 1998). Su tamaño más frecuente es de 44 m<sup>2</sup> (2x22 m); así Morgan (1986), indica unas dimensiones de 22 m de largo por 1,8 m de ancho, aunque otros tamaños de parcelas son utilizados. Sin embargo, se sugiere la adopción de una longitud mínima de 10

m para la evaluación de la escorrentía superficial, pudiendo ser sustancialmente mayor en el caso de evaluaciones relativas a prácticas de conservación y cultivo.

Los monitoreos de los sedimentos interceptados y almacenados en los tanques, se realizan periódicamente y en dependencia de la frecuencia e intensidad de eventos de lluvia. Puede ser semanal, cada 2 semanas o una vez al mes (CIAT, PASALAC y UNA 2005).

Para cuantificar los sólidos en suspensión, se toma una muestra de 1 litro de agua escurrida en cada recipiente colector. Luego se filtra el agua, se seca el papel filtro utilizado en un horno de convección a 60°C por 12 horas. Luego de secada la muestra, se determina su peso con la ayuda de una balanza analítica. El peso de cada muestra, será convertida a peso del volumen total escurrido por evento.

Los sedimentos depositados en el fondo de los recipientes colectores, se secan bajo sombra, para que cuando se sequen se determine su peso. La totalidad de suelo erosionado por evento será expresado en toneladas por hectárea (T/Ha) (Salguil 1995). Según Rafaelli, López y Almorox, 2010, la parcela tipo tiene 22 metros de largo y 1.8 metros de ancho, aunque se utilizan, a veces, otros tamaños de parcela. Se limitan las parcelas con chapas metálicas, madera u otro material estable, que no deje escapar el agua ni se oxide. Los límites deben sobrepasar en 15 a 20 centímetros la superficie del suelo y se embuten en él hasta profundidad suficiente para que no se muevan por la alternancia de humedad y sequía, o congelación y deshielo del suelo. Al final, pendiente abajo, se sitúa una artesana colectora o unas canaletas, cubiertas por una tapadera para impedir la entrada directa de lluvia, desde las que se conducen los sedimentos y la escorrentía hasta los tanques de recogida. Para parcelas grandes o cuando los volúmenes de escorrentía son muy altos, el volumen sobrante de un primer tanque de recogida pasa a través de un divisor que fracciona el volumen en partes iguales y pasa una parte, como una muestra, a un segundo tanque de recogida. En algunas parcelas, antes de pasar al primer tanque de recogida, la escorrentía es conducida por una canaleta hasta un aliviadero que automáticamente registra el volumen vertido. Normalmente, se elige un aliviadero con forma de H porque no se obstruye y se boquea más difícilmente con los

residuos. La precipitación se mide con pluviómetros y fluviógrafos situados, ambos en las inmediaciones de las parcelas (Rafaelli, López y Almorox 2010).

Se añade un floculante a la mezcla de agua y sedimentos recogida en cada tanque. El suelo precipita en el fondo del tanque y el agua clara se saca de los tanques y se mide. Se determina el volumen de suelo que ha quedado en el tanque y se separa una muestra de volumen conocido para secarla y pesarla. El peso de la muestra multiplicado por el volumen total da el peso total de suelo en el tanque. Si todo el suelo ha sido recogido en el tanque, este peso representa la pérdida total de suelo de la parcela. Como se conoce la hora en que se toma cada muestra durante la tormenta, los datos se pueden integrar a lo largo del tiempo dando una gráfica de sedimentación (Morgan 1997).

**Cuándo se han de utilizar parcelas de escorrentía:** Uno de los mejores usos de las parcelas de escorrentía es la demostración, cuando la finalidad es demostrar hechos conocidos. Entre otros ejemplos, para mostrar a los agricultores que se está produciendo una erosión grave o mostrarles que la erosión es mucho menor en una parcela que está cubierta de vegetación que en una parcela desnuda. En este caso las magnitudes reales de la erosión no son importantes, por lo que no es necesario proceder a realizar repeticiones ni recurrir a sistemas colectores complicados, que tratan de captar toda la pérdida de suelo (Hudson 1982).

Otra utilización válida está en los estudios comparativos, por ejemplo para probar, demostrar y/o tener una indicación aproximada del efecto, en la escorrentía o en la erosión, como la existencia o no de una cubierta del suelo o la cuantificación de la escorrentía de una ladera (Hudson 1982).

Un tercer uso posible, es para obtener datos que se van a emplear para construir o para validar un modelo o ecuación destinado a predecir la escorrentía o la pérdida de suelo. No obstante, las dificultades para reunir datos de precisión y confiabilidad suficientes, requieren enormes y numerosos esfuerzos, que solamente los grandes programas experimentales, con un gran costo y durante un largo período, pueden realmente alcanzar este objetivo (Hudson 1982).

### *ii. Medidas en cuenca*

Las medidas del flujo de escorrentía y generación de sedimentos en cuencas y microcuencas fluviales se realizan mediante la implantación de estaciones de aforo. Las estaciones de aforo y los colectores, han sido utilizados para determinación del flujo de agua y sedimentos. Los aforadores registran el caudal y muestrean la escorrentía, para conocer la concentración de sedimentos y con ello la pérdida de suelo. En estas estaciones hidrológicas se estudian conjuntamente los procesos erosivos, la emisión de sedimentos, y los arrates y depósitos de los materiales por el flujo de escorrentía. La degradación específica de una cuenca, es el resultado de cuantificar el volumen de sólidos producidos en una superficie de cuenca, por unidad de superficie y tiempo, y se cuantifica en un punto de la cuenca en donde vierten las aguas. Es un buen indicador de la erosión en una cuenca, pero no permite diferenciar los sectores de la cuenca con mayor afectación. En las cuencas vertientes a un embalse, se puede cuantificar la degradación específica de dicha cuenca vertiente, mediante los datos registrados en las batimetrías. Estos valores permiten la implementación de los modelos estadísticos de medición indirecta. Los procesos hidromorfológicos implicados en una cuenca experimental, son un reflejo natural del proceso de erosión-sedimentación. La escorrentía tiene suficiente fuerza para remover el terreno y producir arroyos y cárcavas; y la topografía es tan heterogénea que permite la deposición de sedimentos. Los datos de transporte de sedimentos obtenidos en una cuencas experimentales permiten la elaboración de balances y presupuestos de sedimentos, estudiar las interacciones entre erosión en laderas y transporte de sedimentos por los cauces, y comprobar las variaciones que se producen en las áreas vertientes en escorrentía y sedimento, durante eventos de diferente duración e intensidad (Rafaelli, López y Almorox 2010).

### *iii. Mediciones volumétricas*

La cuantificación y medida del volumen de suelo erosionado se puede realizar mediante sencillos instrumentos: agujas de erosión, estacas, varillas, perfiladores microtopográficos, secuencia de fotografías, etc. Todas estas técnicas permiten contabilizar directamente el volumen de suelo removido y así cuantificar las tasas de erosión (Rafaelli, López y Almorox 2010).

La tasa de erosión se cuantifica midiendo el rebajamiento de las microformas, en el tiempo. Las agujas o piquetas de erosión se utilizan insertándolas en el suelo y midiendo el rebajamiento unidimensional de la superficie a intervalos regulares de tiempo o después de cada evento de lluvia. Las piquetas tienen muy poca resolución y dan una idea muy limitada y aproximada de lo que ocurre. Es recomendable para zonas con altas tasas de erosión y modificaciones rápidas de las microformas debidas a la erosión; y para mediciones a largo plazo. Debido a esta circunstancia, lo normal es que aporten registros muy altos de erosión (Rafaelli, López y Almorox 2010).

#### b. Evaluación indirecta: modelos de erosión paramétricos

Los métodos indirectos que se utilizaron para hacer una aproximación de la lámina real de suelo que se pierde por erosión hídrica, son los que se describen a continuación.

Los modelos se definen como representaciones simplificadas de un sistema real. Su importancia radica, entre otros aspectos, en la simulación y generación de escenarios, predicción de los fenómenos físicos, sobre todo los de frecuencia rara, a corto, mediano y largo plazo. Asimismo, a través de los modelos se puede obtener relaciones de causa-efecto, sin haber realizado cambios en los sistemas reales (Taboada 2003).

Los modelos de erosión del suelo juegan un papel importante, para planificar medidas anti erosivas del suelo, para conservar el recurso agua y en las evaluaciones de las fuentes no puntuales, incluyendo evaluación e inventario de la carga de sedimentos, planificar y diseñar obras de conservación, para el control de los sedimentos y para el avance de estudios científicos. Los monitores y mediciones de la erosión del suelo in-situ, son caros y demandan mucho tiempo, por lo que los modelos matemáticos de erosión son en muchos casos, la única herramienta para evaluar la erosión.

En general, todos los modelos existentes pueden relacionarse con unos de los siguientes tres grupos (Taboada 2003):

- Los modelos de erosión que calculan solo la pérdida de suelo, utilizando principalmente la ecuación universal de pérdida de suelo, sin ninguna consideración para los procesos de transporte y depositación.
- Los modelos de erosión basados en ecuaciones empíricas y que en la mayoría de los casos, utilizan también una modificación de la ecuación universal de pérdida de suelo, para calcular la pérdida de suelo. Adicionalmente, los procesos de transporte y deposición son simulados, basados en la información topográfica.
- Los modelos de erosión de procesos orientados, los cuales simulan los efectos de las gotas de lluvia, escurrimiento laminar y otros procesos. El transporte y la deposición son calculados también mediante la información topográfica (EROSION 3-D, WEPP). De manera global, los modelos de erosión se clasifican en:

**Cuadro 6: Clasificación de los modelos de erosión del suelo**

<i>Modelo</i>	<i>Tipo</i>	<i>Escala espacial</i>	<i>Escala temporal</i>	<i>Base de datos</i>	<i>Resultados</i>	<i>Referencia (año)</i>
USLE	Empírico	Ladera	Anual	Alta	Erosión	Wischmeier y Smith, 1978
ANSWERS	Físico	Peq. cuencas	Evento/ continuo	Alta	Escurrimiento, pico máximo, erosión, sedimentos, producción de sedimentos	Beasley et. al., 1980
HSPF	Conceptual	Cuenca	Continuo	Alta	Escurrimiento, tasa de escurrimiento, carga de sedimentos	Johanson et. al., 1980
CREAMS	Físico	Parcela	Evento/ continuo	Alta	Erosión, depositación	Knisel, 1980; Knisel, 1995
KINEROS/ KINEROS2	Físico	Ladera/ Cuenca	Peq. Evento	Alta	Escurrimiento, pico máximo, erosión, producción de sedimentos	Smith, 1981; Smith et. al., 1995a y 1995b; Woolhiser et. al., 1990
EPIC	Físico	Ladera/ Cuenca	Peq. Continuo	Alta	Erosión	Williams et. al., 1983
MMF	Empírico/ conceptual	Ladera/ Cuenca	Peq. Anual	Moderada	Escurrimiento, erosión	Morgan et. al., 1984; Morgan, 2001
PESERA	Físico	Ladera/ regional	Continuo	Alta	Escurrimiento, erosión, sedimentos	Kirkby et. al., 2000
AGNPS	Conceptual	Peq. cuencas	Evento/ continuo	Alta	Escurrimiento, pico máximo, erosión, producción de sedimentos	Young et. al., 1989
IHACRES-WQ	Empírico/ conceptual	Cuenca	Continuo	Baja	Escurrimiento, carga de sedimentos	Jakeman et. al., 1990; Jakeman y Vertessey et. al., 2001
EMSS	Conceptual	Cuenca	Continuo	Baja	Escurrimiento, carga de sedimentos	Vertessey et. al., 2001
STREAM	Conceptual	Cuenca	Evento	Moderada	Escurrimiento y erosión	Cerdan et. al., 2002
CASC2D-SED	Físico	Peq. cuencas	Evento/ continuo	Alta	Escurrimiento, pico máximo, erosión y sedimentación separando las partículas por tamaños	Rojas, 2002
SEAGIS	Empírico/ conceptual	Cuenca	Anual	Alta	Erosión, producción de sedimentos	DHI, 2003
AGWA	Conceptual/ físico	Cuenca	Continuo	Alta	Escurrimiento, pico máximo, erosión, producción de sedimentos	Burns et. al., 2004

WEPP	Físico	Ladera/ Cuenca	Peq. Continuo	Alta	Escorrentía, producción de sedimentos, pérdida de suelo	Nearing et. al., 1989; Laflen et. al., 1991
RUSLE	Empírico	Ladera	Anual	Alta	Erosión	Renard et. al., 1991 y 1994
PERFECT	Físico	Parcela	Continuo	Alta	Escorrentía, erosión	Littjeboy et. al., 1992
SWAT	Conceptual	Cuenca	Continuo	Alta	Escorrentía, pico máximo, erosión, producción de sedimentos	Arnold et. al., 1995
IQQM	Conceptual	Cuenca	Continuo	Moderada	Escorrentía, sedimentos, oxígeno disuelto, demanda biológica de oxígeno	DLWC, 1995
EROSIÓN 3D	2D-Físico	Cuenca	Evento	Alta	Escorrentía, erosión, sedimentos	von Werner, 2000; Schmidt et. al., 1997
LISEM	Físico	Peq. cuencas	Evento	Alta	Escorrentía, sedimentos	de Roo et. al., 1996; de Roo y Jatten, 1999
RUSLE-3D	Empírico/ conceptual	Cuenca	Anual	Moderada	Erosión	Mitasova et. al., 1996; Mitas y Mitasova, 1998
USPED	Empírico/ conceptual	Cuenca	Evento/ anual	Moderada	Erosión, depositación	Mitasova et. al., 1996; Mitas y Mitasova, 1998
SHETRAN	Físico	Cuenca	Evento	Alta	Escorrentía, pico máximo, sedimentos, producción de sedimentos	Wicks y Bathurst, 1996
GUEST	Físico	Parcela	Continuo	Alta	Escorrentía, concentración de sedimentos	Rose et. al., 1997
MIKE-11	Físico	Cuenca	Continuo	Alta	Producción de sedimentos, escorrentía	Hanley et. al., 1998
EUROSEM	Físico	Peq. cuencas	Evento	Alta	Escorrentía, erosión, sedimentos	Morgan et. al., 1998
SPL	Empírico/ conceptual	Cuenca	Anual	Moderada	Erosión fluvial, incisión en ríos	Stock y Montgomery, 1999
LASCAM	Conceptual	Cuenca	Continuo	Alta	Escorrentía, sedimentos	Viney y Sivapalan, 1999
WATEM	Conceptual	Cuenca	Anual	Moderada	Erosión	Van Oost et. al., 2000; Van Rompaey et. al., 2001
SEDNET	Conceptual/ empírico	Cuenca	Anual/ continuo	Alta	Sedimentos en suspensión, contribución del flujo superficial, procesos de rills y gullies	Wilkinson et. al., 2004

Fuente: extraído de Latorre y Beguería 2009

### **i. Ecuación universal de la pérdida de suelo (EUPS)**

Según Morgan (1997), el primer intento para desarrollar una ecuación de pérdida de suelo en una ladera fue el de Zingg (1940), quien relacionó la erosión con la pendiente y la longitud de la ladera. Desarrollos posteriores permitieron incluir un factor climático basado en la precipitación máxima en 30 minutos, con un periodo de retorno de 2 años (Musgrave 1947), un factor de cultivo que considera la eficacia protectora de los distintos cultivos (Smith 1958), un factor de conservación y un factor de erodabilidad del suelo. Cambiando el factor climático por el índice de erosividad pluvial (R), se obtuvo finalmente la *Universal Soil Loss Equation (USLE)*, la cual, teniendo en cuenta la experiencia derivada de su uso, fue más tarde modificada y puesta al día (Wischmeier y Smith 1978). La ecuación es:

$$A = R * K * L * S * C * P$$

**Ecuación 1: EUPS**

La EUPS se desarrolló como un método para predecir la pérdida promedio anual de suelo, procedente de la erosión en interarroyuelos y arroyuelos, al poder disponer de los valores de los parámetros, las alternativas de cultivo y de manejo, pueden determinarse para reducir la pérdida de suelo estimada a los valores de tolerancia sugeridos para el tipo de suelo. Según Wischmeier (1976), la EUPS puede utilizarse adecuadamente para:

- Predecir la pérdida anual de suelo de una pendiente, en un campo con condiciones específicas para uso de la tierra.
- Servir como guía, en la selección de sistemas de cultivo y manejo y de prácticas de conservación para suelos y pendientes específicos
- Predecir el cambio en la pérdida de suelo, que resultaría de un cambio en las cosechas de conservación sobre un campo específico.
- Determinar cómo pueden aplicarse o alterarse las prácticas de conservación, para permitir un cultivo más intensivo
- Estimar las pérdidas de suelo en áreas con un uso de suelo distinto del agrícola y,
- Obtener estimaciones de pérdida de suelo, para que los conservacionistas determinen las necesidades de conservación. (Kirby y Morgan 1984)

A pesar de su relativa robustez predictiva, la USLE es muchas veces mal utilizada en los trópicos, generando predicciones incorrectas. Los principales problemas de utilización de la ecuación son: i) aplicación en situaciones donde sus factores no pueden ser determinados de datos con razonable predicción; ii) aplicación de la ecuación en cuencas complejas utilizando los promedios de longitud e inclinación de laderas y valores promedios de K y C; iii) utilización indiscriminada de los factores C y P sin considerar las limitaciones de longitud de laderas; y iv) utilización de la ecuación en situaciones donde hay cárcavas y/o depositación de sedimentos (PHI-LAC 2010).

**La ecuación y sus parámetros:** La ecuación universal predice la pérdida de suelos, debido a procesos erosivos, especialmente de origen hídrico. Se define matemáticamente de la siguiente forma:

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (\text{ec. 1})$$

El significado de los parámetros de la ecuación, que se indica con símbolos alfabéticos es:

- A: La pérdida del suelo por causa de la erosión
- R: El factor asociado a la erosividad de la lluvia. Este factor está ligado a la cantidad, duración e intensidad de los eventos de lluvia y se evalúa dentro de un período dado. Se calcula para todos los eventos pluviales o tormentas que ocurren en un año. El factor R indica la capacidad de las lluvias de causar erosión en los suelos, por características asociadas a las gotas de lluvia, como intensidad, duración y frecuencia, e indirectamente al tamaño, velocidad de impacto y la energía cinética asociada a las gotas de lluvia.
- K: Es el factor asociado a la Erodabilidad del suelo. Este factor indica la susceptibilidad del suelo a ser erodado por propiedades intrínsecas, ligadas a su condición textural, al contenido de materia orgánica, la permeabilidad del perfil del suelo y su desarrollo estructural.
- L: Es el factor asociado con la longitud de la pendiente. Con el factor L se asume que a mayor longitud de la pendiente, hay mayor susceptibilidad de los suelos a sufrir erosión.
- S: Es el factor asociado al grado de la pendiente. Se determina en forma porcentual. Se considera que a mayor grado de pendiente hay mayor erosión, o mayor riesgo de erosión de los suelos.
- C: Es el factor involucrado en la cobertura del suelo. Participa en este factor el manejo que se da a los cultivos, a las áreas no intervenidas en uso agrícola (como ganadería), y a las parcelas forestales de investigación o de regeneración natural, propias de una región.
- P: Es el factor relacionado con las prácticas de conservación de suelos utilizadas en una región o en una zona agrícola. Esto incluye el manejo de suelos mediante prácticas agronómicas o la construcción de obras físicas.

Fuente: Núñez Solís 2001.

Los factores A, R y K son parámetros que se pueden medir en unidades de longitud, áreas, volumen y tiempo. Pero factores S, C y P son variables adimensionales. El grado

de inclinación de la pendiente (S), se mide en porcentaje y se expresa como factor adimensional. En realidad, la expresión “porcentaje de pendiente”, significa medir la longitud del terreno y su grado de inclinación, que luego se transforma en porcentaje.

**Cuadro 7: Dimensiones de los factores componentes de la ecuación universal de la pérdida de suelo (EUPS)**

Factor	Símbolo	Dimensiones	Sistema internacional
Intensidad de lluvia (mm)	I	$\frac{\text{Longitud}}{\text{Tiempo}}$	$\frac{\text{mm}}{\text{h}}$
Energía de la lluvia por lluvia unitaria	e	$\frac{\text{Fuerza} * \text{Longitud}}{\text{Área} * \text{Longitud}}$	$\frac{\text{Megajulios}}{\text{Ha} * \text{mm}}$
Erosividad de las tormentas	EI	$\frac{\text{Longitud} * \text{Fuerza} * \text{Longitud}}{\text{Área} * \text{Tiempo}}$	$\frac{\text{Megajulios}}{\text{Ha} * \text{h}}$
Pérdida de suelos	A	$\frac{\text{Masa}}{\text{Área} * \text{Tiempo}}$	$\frac{\text{Kg}}{\text{Ha} * \text{año}}$
Erosividad anual	R	$\frac{\text{Longitud} * \text{Fuerza} * \text{Longitud}}{\text{Tiempo} * \text{Tiempo} * \text{Área}}$	$\frac{\text{Longitud}}{\text{Tiempo}}$
Erodabilidad del suelo	K	$\frac{\text{Masa} * \text{Área} * \text{Tiempo}}{\text{Longitud} * \text{Área} * \text{Fuerza} * \text{Longitud}}$	$\frac{\text{Ha} * \text{h} * \text{T}}{\text{Ha} * \text{megajulios} * \text{mm}}$

Longitud de la pendiente	L	$\left(\frac{\text{Longitud}}{\text{Longitud}}\right) * M$
Pendiente	P	Adimensional
Manejo de la cobertura	C	Adimensional
Prácticas de conservación	P	Adimensional

Fuente: adaptado de Nuñez Solís 2001

**Análisis de los factores de la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo:** Todos los factores de la ecuación universal (EUPS) tienen gran influencia en la pérdida de suelos. Que uno u otro predominen depende frecuentemente del clima, del relieve, de las propiedades físicas del suelo y de los sistemas de uso, manejo y protección del suelo (Núñez Solís 2001).

- **Erosividad causada por la lluvia (factor R):** La erosividad es un proceso ligado a la agresividad de la lluvia por sus características hidrodinámicas. Incluye el tamaño o diámetro de la gota, su velocidad de impacto en el suelo, que causa desprendimiento de las partículas menores de 0.05 mm, en el ámbito de limos y arcillas, y el transporte posterior de estas partículas en suspensión, arrastradas por películas superficiales de agua (Nuñez Solís 2001). El factor R es una definición de la erosividad como resultado de la precipitación pluvial, y se define como el producto de dos características de la lluvia tempestuosa: la energía cinética y la intensidad máxima durante 30 minutos (Kirby y Morgan 1984).
- **Erodabilidad del suelo (factor K):** El factor de Erodabilidad del suelo (K), permite discriminar lo susceptible que es el suelo a sufrir procesos erosivos. El factor K depende de cinco parámetros:
  - El porcentaje de limo, de 0.002 a 0.05 mm de diámetro, más el porcentaje de arena muy fina de 0.05 a 0.10 mm de diámetro
  - El porcentaje de arena gruesa de 0.1 a 2 mm de diámetros

- El contenido de materia orgánica en porcentaje
- La estructura del suelo: Los parámetros estructurales incluyen los siguientes tipos (cuadro 8):

**Cuadro 8: Código de estructura para definir el valor de K**

Código	Estructura	Tamaño en (mm)
1	Granular masiva muy fina	< 1
2	Granular masiva fina	1 – 2
3	Granular masiva gruesa	2 – 5
4	Granular masiva muy gruesa, columnar, prismática o sin estructura	> 5

Fuente: Río 2012

- La permeabilidad, o la facilidad con la que el agua penetra en el perfil del suelo. Los parámetros de permeabilidad incluyen los siguientes calificativos (cuadro 9):

**Cuadro 9: códigos de permeabilidad del suelo para definir el valor K**

Código	Velocidad (mm/h)	Nombre
1	< 125	Muy rápida
2	125 – 60	Medianamente rápida
3	60 – 20	Moderada
4	20 – 5	Lenta
5	5 – 1.25	Medianamente lenta
6	< 1.25	Muy lenta

Fuente: Río 2012

Para calcular el valor K, se determinan en un laboratorio de suelos los valores porcentuales de limo más la arena muy fina, el porcentaje de arena gruesa, el porcentaje de materia orgánica y su tipo de estructura en una muestra de suelo. En el campo se determina la permeabilidad con pruebas de infiltración o mediante pruebas de conductividad hidráulica. El valor K se obtiene usando el nomograma de la figura 12.

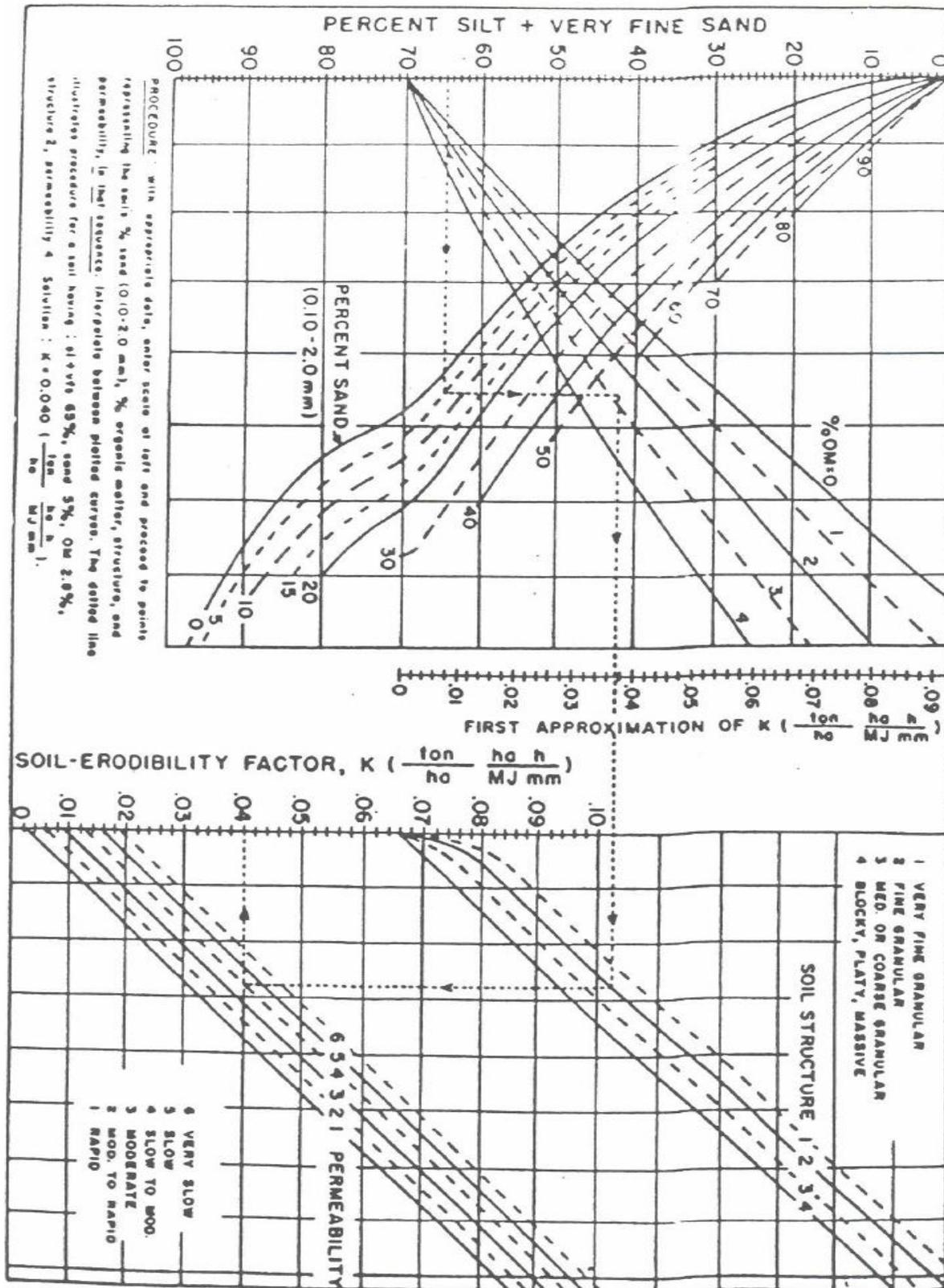


Figura 12: Nomograma para determinar el Factor K, Erodabilidad del suelo. Fuente: (Nuñez Solis, 2001)

- **Longitud y grado porcentual de la pendiente (Factores L y S):** Los factores para la longitud de la pendiente y de la gradiente, se indican con los símbolos L y S. La longitud es la distancia desde el punto de origen de flujo erosivo hasta el punto donde ocurre sedimentación del material. Los cálculos obtenidos con la EPS se basó en una parcela modelo o normalizada, de 22.13 metros de longitud. Para definir L se usa la ecuación:

$$L = \left( \frac{\text{Longitud}}{\text{Tiempo}} \right)^m \quad \text{Ecuación 2: Factor de longitud}$$

Donde:

- L= Factor de longitud de la pendiente
- x= longitud de la pendiente en metros
- m= un exponente que depende del porcentaje de pendiente

Wischmeier y Smith, en 1978, dan recomendaciones para el valor del exponente m. Estas son consideradas adecuadas por Mitchell y Bubenzer (1984), citados por Núñez Solís, 2001, y las acogen en su documento. Los valores son.

m= 0.5 si la pendiente es mayor o igual a 5%

m= 0.4 si la pendiente es > 3 y < 5%

m= 0.3 si la pendiente es >1 y <3%

m= 0.2 si la pendiente es < 1%

El valor S, o factor grado de pendiente, para una parcela normalizada con una pendiente de 9%, se calcula con la siguiente fórmula:

$$S = 0.065 + 0.045s + 0.0065s^2 \quad \text{Ecuación 3: Factor grado de pendiente}$$

Donde:

S= factor de gradiente de pendiente

S= gradiente en porcentaje

- **Manejo de cultivos (Factor C):** Este factor representa la pérdida del suelo a partir de una condición específica del cultivo y la cobertura del suelo. La evaluación de este factor es compleja debido a que existen sistemas de cultivo y de rotaciones muy variados. A la vez, la duración y la secuencia de cultivos en las fincas cambian, en su distribución espacial casi todos los años. Adicionalmente, la etapa de crecimiento del cultivo afecta el valor C.
- **Métodos de control de erosión (Factor P):** Este factor es la proporción de la pérdida del suelo, cuando se hace uso de alguna práctica de conservación. El factor P en la USLE, es la relación que hay entre las pérdidas de suelo que ocurren en un suelo bajo una determinada práctica de conservación de suelo y las pérdidas de suelo que ocurren en la misma área sin prácticas de conservación

#### **ii. Ecuación universal de pérdida de suelo modificada (EUPSM)**

Con el fin de aplicar la USLE o EUPS a cuencas, Williams y Berndt (1996, 1997), modificaron el factor R obteniendo la MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation). La MUSLE evalúa el volumen de sedimentos producido en una cuenca, durante un determinado episodio tormentoso. Para su desarrollo se usaron datos de 18 cuencas pequeñas, que explican el 92% de la variación de los sedimentos producidos (Rafaelli, López y Almorox 2010). De esta manera se sustituyó el índice de erosividad por un par de valores estrechamente relacionados con cualquier modelo hidrológico que los estime, a fin de predecir los sedimentos emitidos por las cuencas en un aguacero concreto (Tragsa 2003). La expresión en unidades del sistema internacional es:

$$Y = 11.8(Q * q_p)^{0.56} KLSCP$$

**Ecuación 4: Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE)**

Donde:

Y= Rendimiento de sedimento de la cuenca (T)

Q= Volumen de escurrimiento por tormenta en metros cúbicos (m<sup>3</sup>)

qp= Velocidad máxima de caudal (m<sup>3</sup>/s)

K, L, S, C y P, son factores iguales que en la ecuación de USLE (EUPS)

La unidad de Y se convierte en T/Ha cuando Q es en mm y qp es en mm/hr. El factor de escurrimiento (Q \* qp proporciona una fuente de energía y, como la tasa de escurrimiento por unidad de superficie disminuye a medida que aumenta la superficie de drenaje; el modelo contiene una tasa de desplazamiento implícita). MUSLE es útil en cuencas con superficies de alrededor de 100 km<sup>2</sup> (Díaz Herrero, Laín Huerta, y Llorente 2008).

- **Velocidad máxima de caudal (qp):** existe una gran variedad de métodos empíricos; en general todos se derivan del método racional (Villón Béjar 2006), es por ello que se utilizará dicho método. En el método racional, se supone que la máxima escorrentía ocasionada por una lluvia se produce cuando la duración de ésta es igual al tiempo de concentración (tc, de una cuenca es el tiempo necesario para que una gota de agua que cae en el punto hidrológicamente más alejado de aquella, llegue a la salida o estación de aforo). Por lo anterior el caudal máximo se calcula por medio de la siguiente expresión, que representa la fórmula racional:

$$q_p = \frac{C * I * A}{360}$$

**Ecuación 5: Caudal máximo**

Donde:

qp= caudal máximo, m<sup>3</sup>/s

C= coeficiente de escorrentía, que depende de la cobertura vegetal, la pendiente y tipo de suelo, adimensional o lámina escorrentía mm (Qe)/lámina de precipitación mm

I= intensidad máxima de la lluvia, para una duración igual al tiempo de concentración, y para un período de retorno, mm/h

A= área de la cuenca, ha

**Tiempo de concentración (tc):** se denomina tiempo de concentración al tiempo transcurrido desde que una gota de agua cae, en el punto más alejado de la cuenca, hasta que llega a la salida de ésta (estación de aforo). Este tiempo es función de ciertas características geográficas y topográficas de la cuenca. Existen varias formas de hallar el tiempo de concentración  $t_c$  de una cuenca (Villón Béjar 2006).

Medida directa usando trazadores, usando las características hidráulicas de la cuenca, estimando velocidades, usando valores obtenidos por Ramser y usando fórmulas empíricas como la de Kirpich, Australiana, del SCS etc. (Villón Béjar 2006).

Según ecuación 6 de Kirpich, el tiempo de concentración es:

$$T_c = 0.0195 \left( \frac{L^3}{H} \right)^{0.385}$$

**Ecuación 6: Tiempo de concentración**

Donde:

$t_c$  = Tiempo de concentración, min

$L$  = Máxima longitud del recorrido, m

$H$  = Diferencia de elevación entre puntos extremos del cauce principal, m

**Coefficiente de escorrentía (C):** la escorrentía, es decir, el agua que llega al cauce de evacuación, representa una fracción de la precipitación total. A esa fracción se le denomina coeficiente de escorrentía que puede ser determinada según Martínez, 2005 por la ecuación 7 o por el cuadro 10, que no tiene dimensiones.

$$C = \frac{\text{Precipitación, mm}}{\text{Esguerrimiento, mm}}$$

**Ecuación 7: Coeficiente de esguerrimiento**

**Cuadro 10: Valores del coeficiente de escorrentía C.**

Tipo de vegetación	Pendiente %	Textura		
		Franco arenosa	Franco-arcillo-limoso-franco-limosa	Arcillosa
Forestal	0-5	0.10	0.3	0.4
	5-10	0.25	0.35	0.5
	10-30	0.30	0.5	0.6
Praderas	0-5	0.10	0.3	0.4
	5-10	0.15	0.35	0.55
	10-30	0.20	0.4	0.6
Terrenos cultivados	0-5	0.30	0.5	0.6
	5-10	0.40	0.6	0.7
	10-30	0.50	0.7	0.8

Fuente: Villalobos Araya 2005

**Volumen de escurrimiento (Qe):** es uno de los métodos que más se utiliza para el cálculo de la escorrentía total, a partir de datos de precipitación y parámetros de la cuenca de drenaje en estudio (Villalobos Araya 2005). Este método fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos; el parámetro de mayor importancia de la lluvia generadora es la altura de ésta, su intensidad pasa a un segundo plano. Su principal aplicación es la estimación de las cantidades de escurrimiento tanto en el estudio de avenidas máximas como en el caso del cálculo de aportaciones líquidas (Villón Béjar 2006).

El nombre del método deriva de una serie de curvas, cada una de las cuales lleva el número N, que varía de 1 a 100. Un número de curva N=100, indica que toda la lluvia escurre, y un número N=1, indica que toda la lluvia se infiltra; por tal razón los números de curvas, representan coeficientes de escorrentía. El cálculo se lleva a cabo a partir de la siguiente relación (ecuación 8):

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

**Ecuación 8: Escorrentía total acumulada**

Dónde:

Q= escorrentía total acumulada o escorrentía de diseño, cm

P= precipitación, cm

S= infiltración potencial máxima, cm

El SCS después de estudiar un gran número de pequeñas cuencas estableció una relación para estimar S a partir de número de curva N, mediante la ecuación 9:

$$S = \frac{2540}{N} - 25.4 \quad \text{Ecuación 9: Infiltración potencial máxima}$$

Por lo que sustituyendo la ecuación 9 en la ecuación 8 y realizando operaciones resulta la ecuación 10:

$$Q = \frac{(N(P + 50.8) - 5080)^2}{N(N(P - 203.2) + 20320)} \quad \text{Ecuación 10: Escorrentía total acumulada}$$

Dónde:

Q= escorrentía total acumulada o escorrentía de diseño, mm

P= precipitación, mm

N= número de curva

**Estimación del número de curva de escurrimiento (N):** el N es un parámetro adimensional e indica las características de la respuesta de escorrentía de una cuenca de drenaje. En el método de número de Curva, este parámetro es relacionado con el uso de la tierra, prácticas de tratamiento, condiciones hidrológicas, grupo hidrológico de suelos y

condiciones antecedentes de la humedad del suelo en la cuenca de drenaje (Salguero 2010).

**Condición hidrológica:** se refiere a la capacidad de la superficie de la cuenca hidrográfica para aumentar o impedir la escorrentía de la precipitación, y consecuentemente es una media de la cantidad almacenada por la cuenca (Salguero 2010). Está en función de la cobertura vegetal que se tenga y se distinguen tres tipos de condición hidrológica, según cuadro 11 (Villalobos Araya 2005):

**Cuadro 11: Tipos de condición hidrológica.**

<b>Cobertura vegetal</b>	<b>Condición hidrológica</b>
> 75% del área	Buena
Entre 50% y 75% del área	Regular
< 50% del área	Pobre

Fuente: Villón Béjar 2006

**Grupo hidrológico de suelos:** describe el tipo de suelo, los cuales pueden ser:

**Cuadro 12: clasificación hidrológica de los suelos.**

<b>Grupo de suelos</b>	<b>Descripción</b>
<b>A</b>	Más bajo potencial de escorrentía: incluye arenas con muy poco limo y arcilla. También incluye suelos profundos de alta permeabilidad por razones especiales (ejemplo oxisoles)
<b>XII Arenosa</b>	
<b>XI Arenoso-Franca</b>	
<b>IX Franco-Arenosa</b>	Moderadamente bajo potencial de escorrentía: principalmente, suelos arenosos menos profundos que A. Su capacidad de infiltración después de saturados es superior al promedio.
<b>B</b>	
<b>VIII Franco-Limosa</b>	
<b>VII Franca</b>	Moderadamente alto potencial de escorrentía: comprende suelos superficiales y suelos que
<b>X Limosa</b>	
<b>C</b>	
<b>VI Franco-Arcillo-Arenosa</b>	

	<b>V</b>	<b>Franco-Arcillo-Limosa</b>	contienen alto contenido de arcilla y coloides, aunque menos que aquellos del grupo D. Después de saturación el grupo tiene una capacidad de infiltración menor que el promedio.
	<b>IV</b>	<b>Franco-Arcillosa</b>	
	<b>III</b>	<b>Arcillo-Arenosa</b>	Más alto potencial de escorrentía: suelos con infiltración muy lenta, cuando están muy húmedos.
<b>D</b>	<b>II</b>	<b>Arcillo-Limosa</b>	Incluye principalmente arcillas expansivas y suelos superficiales con horizontes casi impermeables (o roca) cerca de la superficie.
	<b>I</b>	<b>Arcillosa</b>	

Fuente: adaptado de Villalobos Araya 2005 y Tragsa; Tragatec y Ministerio de Ambiente, 1998.

**El uso y tratamiento del suelo:** describe el tipo y la condición de la cubierta vegetal (Salguero 2010). **El uso de la tierra:** es la cobertura de la cuenca. Incluye toda clase de vegetación, escombros, pajonales, desmontes, así como las superficies de agua (lagos, pantanos, ciénagas, fangales, etc.) y superficies impermeables (carreteras, cubiertas, etc.). **El tratamiento de la tierra:** se aplica sobre todo a los usos agrícolas de la tierra e incluye prácticas mecánicas tales como sistemas de bordos, curvas de nivel, terraplenado y ejecución de prácticas para el control de erosión y rotación de cultivos. El método del SCS distingue tres clases de tierras, según su uso y tratamiento (Villón Béjar 2006):

- Tierras cultivadas
- Tierras cubiertas de pastos o hierbas
- Tierras cubiertas de bosque y arboledas

**Condición de humedad antecedente (CHA):** tiene cuenta la historia reciente de la precipitación, y consecuentemente es una media de la cantidad almacenada por la cuenca (Salguero 2010). La condición o estado de humedad tiene en cuenta los antecedentes previos de humedad de la cuenca; determinado por la lluvia total en el período de 5 días anterior a la tormenta (Villón Béjar 2006).

El SCS usa tres intervalos de CHA (Villón Béjar 2006):

**CHA-I:** es el límite inferior de humedad o el límite superior de la infiltración potencial máxima (S). Hay mínimo potencial de escurrimiento. Los suelos de la cuenca están lo suficientemente secos para permitir el arado o cultivos.

**CHA-II:** es el promedio para el cual el SCS preparó el cuadro 14.

**CHA-III:** es el límite superior de humedad o el límite inferior de S. Hay máximo potencial de escurrimiento. La cuenca está prácticamente saturada por lluvias anteriores.

Se han confeccionado cuadros que permiten determinar el número curva, N, en función de la CHA, que tenga el suelo, así como la condición hidrológica y prácticas agrícolas que se realicen.

**Cuadro 13: Condición de humedad antecedente (CHA)**

Condición de humedad antecedente (CHA)	Precipitación acumulada de los 5 días previos al evento en consideración, cm	
	Estación seca	Estación de crecimiento
I	< 1.3	< 3.5
II	1.3 a 2.5	3.5 a 5
III	> 2.5	> 5

Fuente: Villón Béjar, 2006

El SCS presenta el cuadro 13 para estimar CHA, considerando el antecedente de 5 días de lluvia, que es simplemente la suma de la lluvia de los 5 días anteriores al día considerado. El cuadro 14 permite calcular el número de curva N(II) para CHA-II. Si se tiene CHA-I o CHA-II, el número de curva equivalente se calcula con las siguientes ecuaciones:

$$N_{(I)} = \frac{4.2N_{(II)}}{10 - 0.058N_{(II)}}$$

**Ecuación 11: Condición de humedad I**

$$N_{(III)} = \frac{23N_{(II)}}{10 + 0.13N_{(II)}}$$

**Ecuación 12: Condición de humedad III****Cuadro 14: Número de curva N para complejos hidrológicos de suelos cobertura (para condición de humedad antecedente II e la= 0.25).**

Uso de la Tierra o Cobertura	Prácticas de manejo	Condiciones Hidrológicas	Grupo Hidrológico de Suelo			
			A	B	C	D
Barbecho	Hileras rectas	Pobre	77	86	91	94
	Hileras rectas	Pobre	72	81	88	91
	Hileras rectas	Bueno	67	78	85	89
Cultivos en hilera	Curvas	Pobre	70	79	81	88
	Curvas	Bueno	65	75	82	86
	Curvas /Terrazas	Pobre	66	74	80	82
	Curvas /Terrazas	Bueno	62	71	78	81
	Hileras rectas	Pobre	65	76	84	88
	Hileras rectas	Bueno	63	75	83	87
Granos Pequeños	Curvas	Pobre	63	74	82	85
	Curvas	Bueno	61	73	81	84
	Curvas /Terrazas	Pobre	61	72	79	82
	Curvas /Terrazas	Bueno	59	70	78	81
	Hileras rectas	Pobre	66	77	85	89
	Hileras rectas	Bueno	58	72	81	85

praderas rotativas	Curvas	Pobre	64	75	83	85	
	Curvas	Bueno	55	69	78	83	
	Curvas	Pobre	63	73	80	83	
	/Terrazas						
	Curvas	Bueno	51	67	76	80	
	/Terrazas						
		Pobre	68	79	86	89	
		Regular	49	69	79	84	
		Bueno	39	61	74	80	
Pastos en hilera	Curvas	Pobre	47	67	81	88	
	Curvas	Regular	25	59	75	83	
	Curvas	Bueno	6	35	71	79	
Prados (permanente)		Bueno	30	58	71	78	
		Pobre	45	66	77	83	
Bosques (para uso de la finca)			Regular	36	60	73	79
			Bueno	25	55	70	77
Granja (dependencias)			59	74	82	86	
Carreteras de tierra			72	82	87	89	
Carreteras de polvo			74	84	90	92	

Fuente: Villón Béjar, 2006

El cuadro 15 también permite determinar los números de curva equivalentes CHA-I ó CHA-III, conociendo el número de curva para CHA-II (Villón Béjar 2006).

**Cuadro 15: Tabla de conversión para el número de curva (CN) de Humedad Antecedente para Clases II a Clases AMC I o II**

CN	CN	CN	CN	CN	CN
AMC II	AMC I	AMC III	AMC II	AMC I	AMC III
100	100	100	58	38	76
98	94	99	56	36	75
96	89	99	54	34	73
94	85	98	52	32	71
92	81	97	50	31	70
90	78	96	48	29	68
88	75	95	46	27	66
86	72	94	44	25	64
84	68	93	42	24	62
82	66	92	40	22	60
80	63	91	38	21	58
78	60	90	36	19	56
76	58	89	34	18	54
74	55	88	32	16	52
72	53	86	30	15	50
70	51	85	25	12	43
68	48	84	20	9	37
66	46	82	15	6	30
64	44	81	10	4	22
62	42	79	5	2	13
60	40	78	0	0	0

Fuente: Villón Béjar, 2006

## 2.3 MARCO REFERENCIAL

### 2.3.1 Ubicación geográfica

El área de estudio fue denominada Microcuenca Los Sujuyes (figura 13), debido a la predominancia de área superficial de la Finca Los Sujuyes. Dicha microcuenca está ubicada dentro de la zona cañera de la costa sur de Guatemala (CENGICAÑA 2012), además pertenece a la cuenca del río Cristóbal, Cuenca Coyolate, dentro de los límites del municipio de Santa Lucia Cotzumalguapa, Departamento de Escuintla. Cuenta con un área de 319.22 hectáreas. Se encuentra en el cuadrante con las siguientes coordenadas

**Cuadro 16: Coordenadas de ubicación, microcuenca Los Sujuyes**

Latitud	Longitud	Latitud	Longitud
N 14°25'34''	91°1'25'' W	S 14°23'42''	91°0'17'' E
N 14°25'34''	91°0'17'' E	S 14°23'42''	91°1'25'' W

### 2.3.2 Clima

De acuerdo a la posición altitudinal expresada en metros cuadrados sobre el nivel del mar (msnm) la microcuenca pertenece al estrato alto de la zona cañera, localizándose en la zona superior a los 300 msnm (figura 13). En el cuadro 17, se presentan las características climáticas por estrato altitudinal de la zona cañera (CENGICAÑA, 2012).

**Cuadro 17: Caracterización climática en la zona cañera**

Estrato	Altitud (msnm)	Pp (mm/año)	T° (°C)			Radiación solar (MJ/m2/día)	Velocidad media del viento (Km/h)
			Min.	Media	Máx.		
Alto	> 300	4100.0	20.2	26.2	32.2	17.7	5.2
Medio	100 - 300	3700.0	20.5	26.7	32.2	17.3	6.8
Bajo	40 - 100	1900.0	21.2	27.3	33.8	18.4	6.2
Litoral	< 40	1500.0	21.0	27.5	33.4	18.0	8.7

Fuente: Adoptado de CENGICAÑA 2012

Las lluvias en la zona se distribuyen en dos estaciones: época lluviosa que ocurre entre mayo y octubre; en tanto que junio y septiembre registran la mayor precipitación también, pero un periodo de canícula de 15 días entre julio y agosto. La época lluviosa se marca entre octubre y mayo; los cuales coinciden con el periodo de zafra (CENGICAÑA 2012).

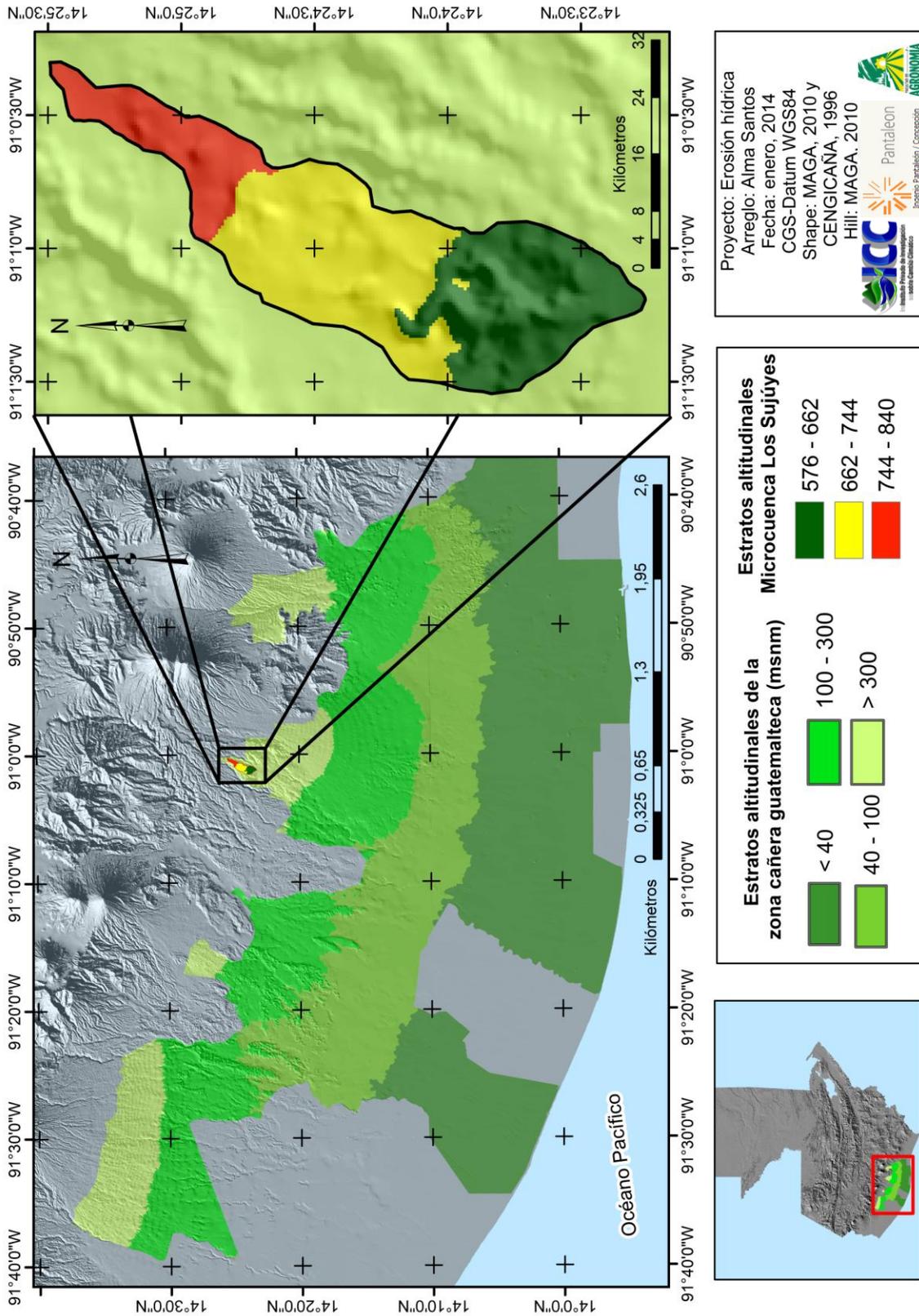


Figura 13: Ubicación de la microcuenca Los Sujúyes, según estratos altitudinales de la zona cañera de Guatemala.

Según el mapa de isoyetas del MAGA 2010, la precipitación en la microcuenca se encuentra en un rango de 3500 a 5600 mm/año.

### **2.3.3 El Relieve**

Geológicamente la microcuenca se encuentra dentro de la de la región fisiográfica, conocida como Pendiente volcánica reciente, según el Atlas Nacional, editado por el Instituto Geográfico Nacional; esta región incluye los volcanes de más reciente formación en Guatemala, así como el material asociado que ha sido drenado o depositado hacia la Costa Sur. Dicho material es principalmente de edad cuaternaria, y la actividad que lo produjo está asociada con una zona de fallada paralela a la costa, a lo largo de las laderas hacia el sur del altiplano volcánico. Según el mapa de asociaciones de suelos de Guatemala, son suelos volcánicos (Herrera Ibáñez 2006). El relieve de la cuenca presenta alturas que van de los 576 a 840 msnm.

### **2.3.4 Zonas de vida**

Según el mapa de Zonas de Vida de Holdrige, La microcuenca Los Sujuyes se encuentra ubicada dentro de la zona de vida “Bosque muy húmedo subtropical (cálido) (Bmh-S(c))”

### **2.3.5 Suelos**

Según el Centro Guatemalteco de investigación y capacitación de la caña de azúcar – CENGICAÑA- (1996), los suelos de la microcuenca son pocos evolucionados del perfil ABC y AC, de colores oscuros humíferos, de baja densidad aparente, de consistencia fiable a suelta, desarrollados esencialmente sobre materiales amorfos; de reacción principalmente ácida y de alta retención de fósforo. Los suelos de la microcuenca pertenecen al orden de los Andisoles, derivados de ceniza volcánica, oscuros, con altos contenidos de materia orgánica, desde el punto de vista químico, tienen ciertas limitaciones como la alta retención de fosfatos y sulfatos (CENGICAÑA 2012).

### **2.3.6 Recurso hídrico**

La red hídrica está formada por un afluente del río Xatá, la corriente principal tienen una longitud de 4.8 kilómetros, desde su origen hasta desembocar al río Xatá.

### 2.3.7 Vegetación

En la cabecera de la microcuenca, en la zona más alta se encuentra una plantación de bosque energético o cultivo forestal (eucalipto), que abarca 45.62 hectáreas; en la parte media se encuentra el cultivo de caña de azúcar (variedad PR75-2002), el cual abarca un área de 171.22 hectáreas; mientras que en la parte baja de la cuenca, se encuentra un bosque mixto que incluye bosque de ribera, cítricos y principalmente hule, que en su totalidad abarca 102.38 hectáreas (figura 15). Los valores del área superficial ocupada por los diferentes tipos de cobertura se presentan en el cuadro 18.

**Cuadro 18: Cobertura vegetal y área que ocupa en la microcuenca Los Sujuyes**

<b>Cobertura</b>	<b>Área (Ha)</b>
Bosque mixto	102.38
Caña de azúcar	171.22
Cultivo forestal	45.62
<b>Total</b>	<b>319.22</b>

Es importante mencionar que los cultivos principales (caña de azúcar, eucalipto y hule), cuentan con una serie de prácticas de conservación de suelos, dentro de las que destacan las acequias de ladera en el cultivo de caña de azúcar y siembra a curvas a nivel en los tres diferentes cultivos, como parte del manejo agronómico que implementa el ingenio Pantaleón.



**Figura 14: Acequias de ladera y cultivos a nivel, cultivo de caña de azúcar. Fuente: ICC e ingenio Pantaleón, 2012**

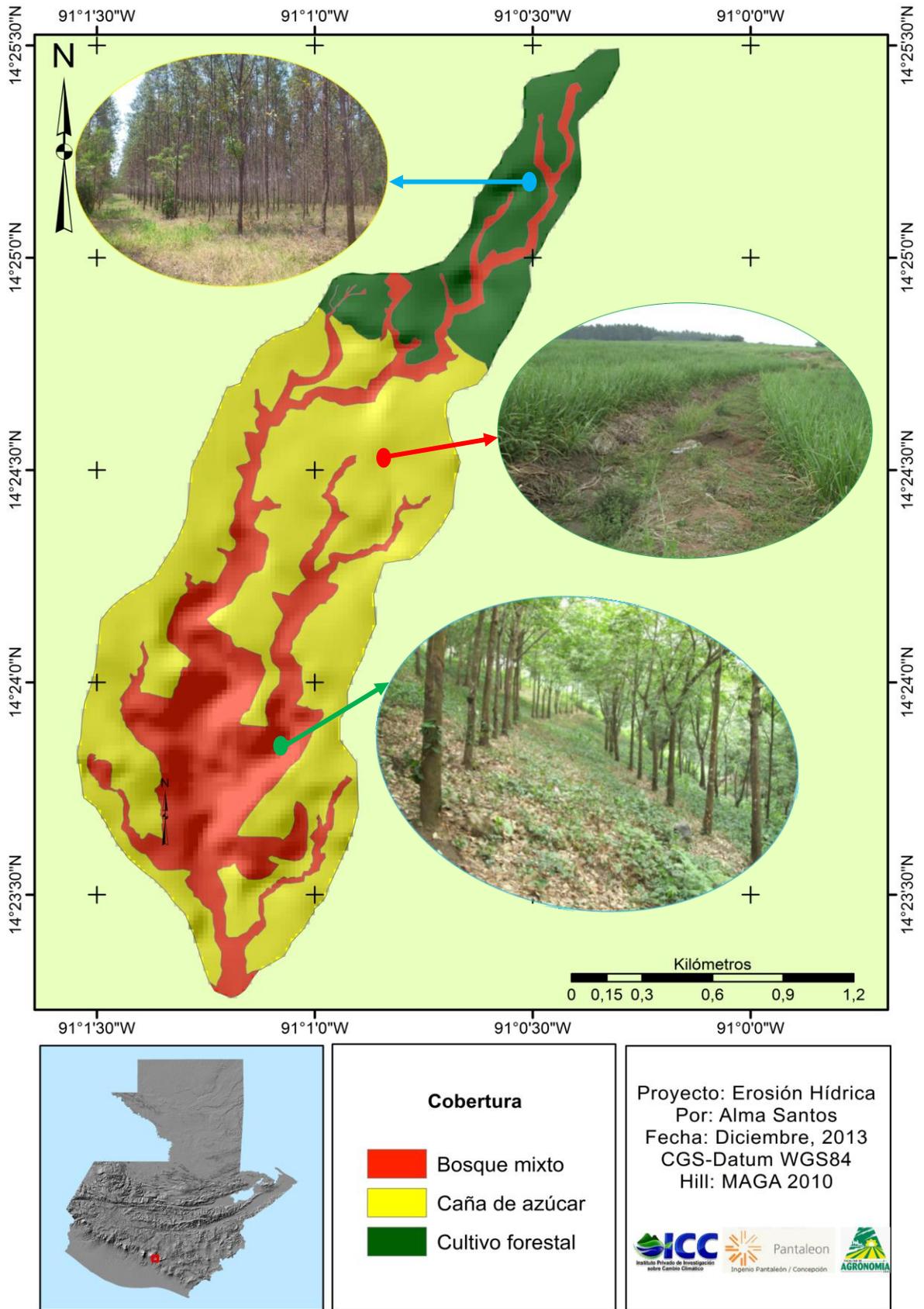


Figura 15: Cobertura vegetal, microcuenca Los Sujues

## **2.4 OBJETIVOS**

### **2.4.1 Objetivo general**

2.4.1.1 Estimar la pérdida de suelo por procesos de erosión hídrica, en la parte alta de la zona cañera, microcuenca Los Sujuyes, Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla, Guatemala.

### **2.4.2 Objetivos específicos**

2.4.2.1 Estimar la pérdida de suelo por escorrentía superficial, mediante parcelas de escurrimiento, la ecuación universal de pérdida de suelo modificada (EUPSM o MUSLE) y un sistema de información geográfica.

2.4.2.2 Evaluar la influencia de los factores edafo-climáticos, en la pérdida de suelo por erosión hídrica.

2.4.2.3 Identificar zonas vulnerables a la erosión hídrica en la microcuenca para proponer medidas de control.

## 2.5 METODOLOGIA

### 2.5.1 Estimación de la pérdida del suelo por erosión hídrica

#### A. Estimación de pérdidas del suelo utilizando parcelas de escurrimiento

##### a. Instalación de las parcelas experimentales.

La ubicación de las parcelas de escurrimiento se basó en los siguientes aspectos: a) uso actual (cobertura); teniendo en la microcuenca tres tipos de cobertura siendo estas: cultivo forestal (eucalipto de 2 años), cultivo de caña de azúcar (variedad PR7e-2002) y bosque mixto, b) pendiente; basados en la clasificación de tierras por capacidad de uso establecida por el INAB en 1999 y c) accesibilidad para el monitoreo de las mismas. Previo a la instalación de las parcelas de escurrimiento se coordinó con el personal del Ingenio Pantaleón, el cual colaboró con materiales y personal de campo (figura 16).

Para la instalación de las parcelas de escurrimiento, se delimitó un área de 75 m<sup>2</sup> (10 metros de largo y 7.5 metros de ancho, según Chamorro Batres, 2007 y Carrera Escobar, 2007) para el área con cultivo de caña de azúcar, teniendo 2 parcelas de escurrimiento bajo esta cobertura, mientras que en el cultivo forestal (eucalipto y hule) las parcelas contaron con un área de 150 m<sup>2</sup> (15 metros de largo y 10 metros de ancho), esta ampliación se hizo para tener una mejor representatividad en cuando al número de árboles dentro de las parcelas (cobertura vegetal).



Figura 16: Establecimiento de parcelas de escurrimiento, Microcuenca Los Sujúyes. A) Delimitación de parcelas y B) Revestimiento de bordes con nylon

Para la delimitación de dichas parcelas se hicieron pequeños túmulos de suelo revestidos de nylon (figura 16A), con una altura promedio de 15 cm, éstos sirvieron para delimitar las parcelas (figura 16B), su uso, evitó la penetración de escorrentía superficial de otras áreas aledañas.

#### b. Instalación del sistema colector

El sistema colector de agua y sedimentos consistió en canales hechos en la superficie del suelo con un revestimiento de nylon (figura 17A), colocados en la parte más baja de la parcela con un leve desnivel, los cuales se encargan de recibir el agua de escorrentía y dirigirla hacia los recipientes colectores (Reyes García 2010), Los recipientes colectores fueron toneles de 54 galones de capacidad.



**Figura 17: Sistema colectores de escorrentía y sedimentos. A) Canal de conducción y B) recipientes colectores.**

Para garantizar la permanencia y durabilidad de las parcelas se utilizaron materiales con un menor atractivo a personas que pudieran interferir con el estudio, tal es el caso de los materiales utilizados en la delimitación de las parcelas, no se utilizaron tablas de madera y en su lugar se hicieron bordes de suelo revestidos de nylon; para el sistema colector

(canal y recipientes colectores) se optó por enterrar los toneles y realizar un canal que no fuera de aluminio u otro material metálico y en su lugar se hizo un pequeño canal en la superficie del suelo el cual se revistió con nylon, estos cambios se realizaron por recomendaciones del personal del ICC.

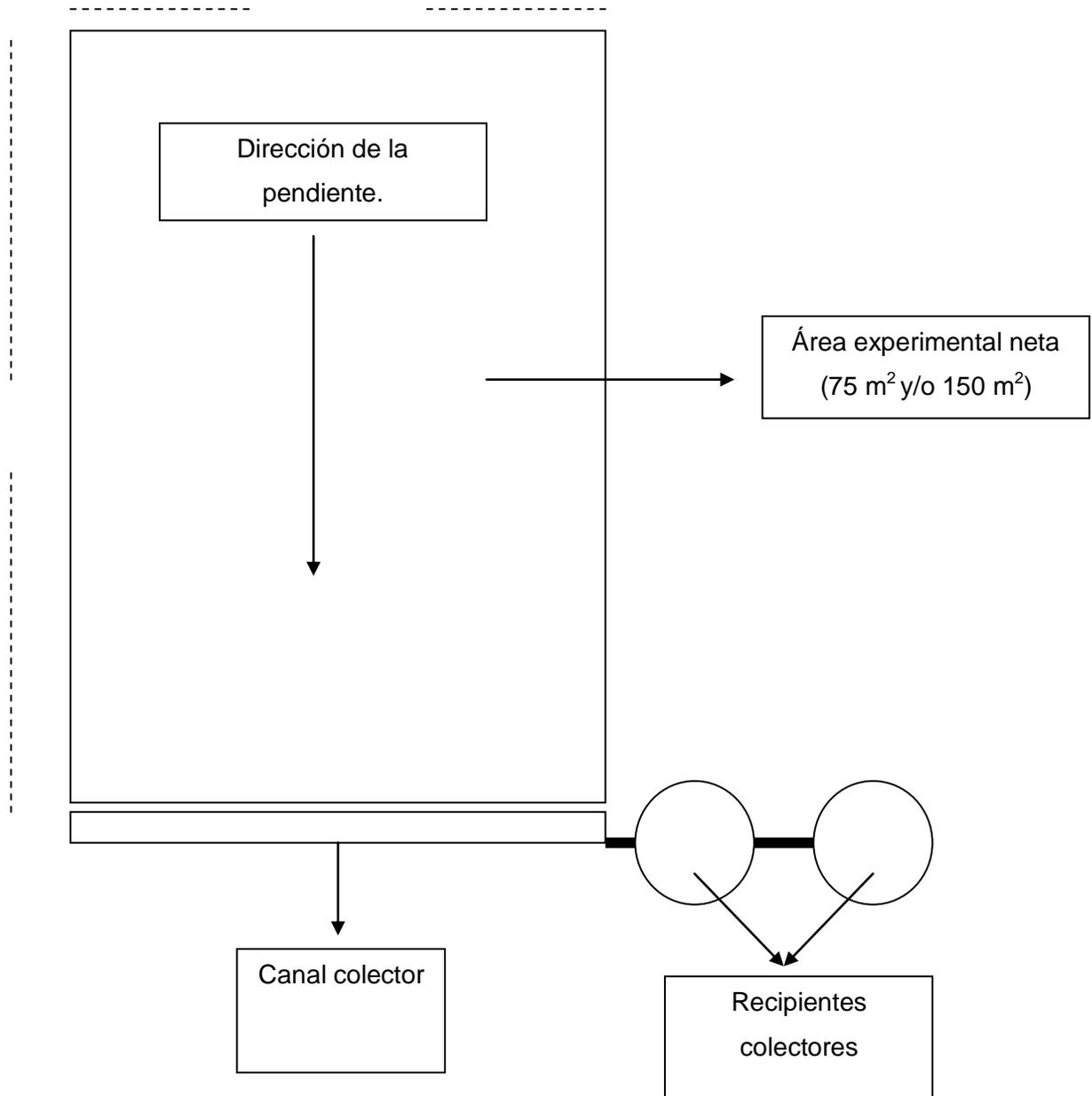


Figura 18: Croquis de la unidad experimental. Fuente: Carrera, R. 2007

## Mantenimiento a las unidades experimentales

Por parte del ingenio Pantaleón, se recibió información diaria sobre precipitación diaria, registrados por pluviómetros en el área de estudio, después de un evento de lluvia mayor a 10 mm, por la mañana, se medía la altura de escorrentía recogida y se tomaba una muestra de material retenido (suelo y agua) de aproximadamente 600 a 100 ml por tonel, luego se eliminaba el material restante y se dejaba limpio el sistema colector de agua y sedimentos para el siguiente evento de lluvia.

Además constantemente se le estuvo dando mantenimiento a cada parcela de escorrentía, como limpias y cuidados al equipo que se encontraban dentro de ellas, para evitar que factores ajenos al experimento, pudieran afectar las lecturas y los resultados de la investigación.

## Medición de variables

### i. Esgurrimiento superficial

Primero se convirtió la altura de agua recibida por el recipiente colector (E) en metros, a una superficie igual al área de recepción o parcela de escorrentía (Villón Béjar 2006), mediante la Ecuación 13.

Volumen del cilindro = volumen área

$$A_c * E = A * h$$

Donde:

$A_c$  = área del cilindro,  $m^2$

$A$  = área de recepción (área de la parcela de escorrentía),  $m^2$

$E$  = altura del agua en el recipiente colector, m

$h$  = altura de escorrentía en (m) para una superficie igual al área de recepción (área de la parcela de escorrentía)

Por lo que la altura de escorrentía está dada por:

$$h = \frac{A_c}{A} * E$$

**Ecuación 13: Altura de escorrentía**

## ii. Cantidad de suelo erosionado

Se sacó un poco de agua de los recipientes colectores para limpiar el canal (figura 19A), con el objeto de llevar los sedimentos que se quedaban en el mismo hasta el recipiente colector. Dichos sedimentos fueron producto del arrastre de sedimentos provenientes de la parcela de escorrentía provocados por la lluvia.

Se agitó toda el agua de los recipientes colectores, a manera que todo el sedimento que se encuentre depositado en el fondo del recipiente entrara en suspensión (figura 19B), y así poder tomar una muestra homogénea de 600 a 1000 ml de cada recipiente colector.



**Figura 19: Toma de muestras. A) Limpieza del canal y B) agitación del material colectado**

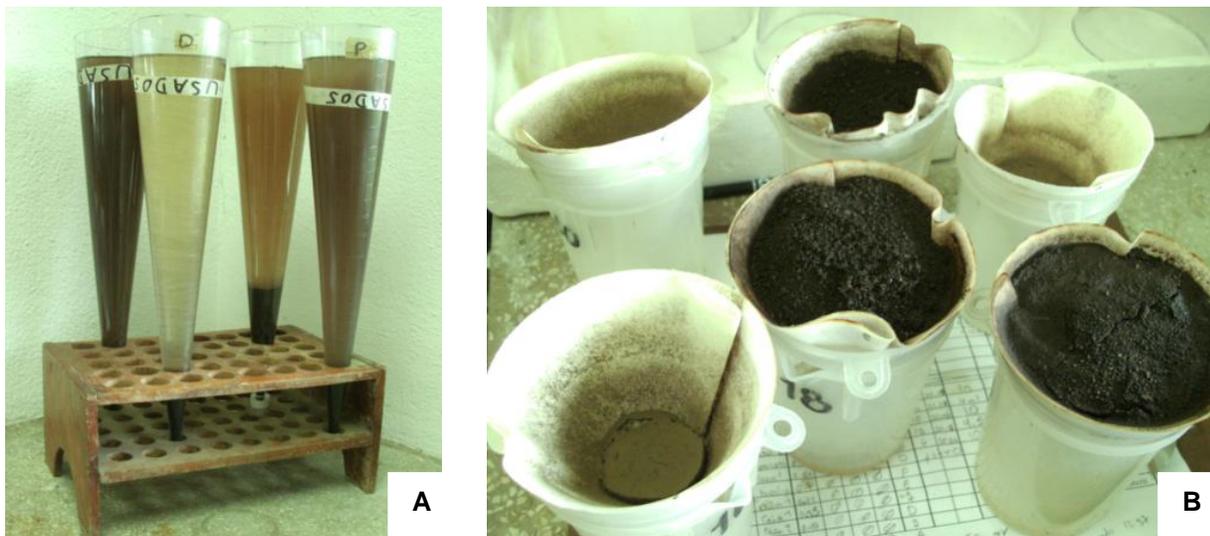
Se coordinó con el laboratorio agronómico de CENGICAÑA, para poder trabajar dentro de sus instalaciones. Se contó con un espacio adecuado para almacenar las muestras obtenidas en las parcelas de escorrentía y se obtuvieron los gramos de suelo erosionado (en peso suelo seco) por cada evento de lluvia, los cuales se determinaron de la siguiente forma:

- 1<sup>o</sup>. Luego de sacar la muestra de cada parcela de escorrentía, fueron puestas a sedimentar en los conos sedimentadores Imhoff (figura 20A, dos de ellos donados por Merck y cuatro de ellos prestados por el ingenio Madre Tierra). Dichos conos están calibrados para obtener mililitros de lodo (suelo + agua)

por mililitros de agua. Antes de tomar la lectura se agitaba con una varilla recorriendo la pared del cono.

2º. Con el apoyo de la balanza semianalítica se obtuvo el peso del papel filtro (tara), utilizado para filtrar las muestras que se encontraban en los conos Imhoff.

3º. Una vez filtradas las muestras (figura 20B) se metían al horno durante un día a 105°C, para que alcanzaran un peso constante. Se le restaba el peso del papel filtro y así se obtenía el peso de suelo seco, en gramos, y mediante transformaciones de unidades de medida se obtuvieron las toneladas por hectárea de suelo erosionado.



**Figura 20: Análisis en laboratorio. A) Sedimentación de las muestras en los conos Imhoff y B) Filtración de las muestras**

### **B. Estimación de la pérdida del suelo utilizando la ecuación universal de pérdida de suelo modificada -EUPSM o MUSLE por sus siglas en inglés-**

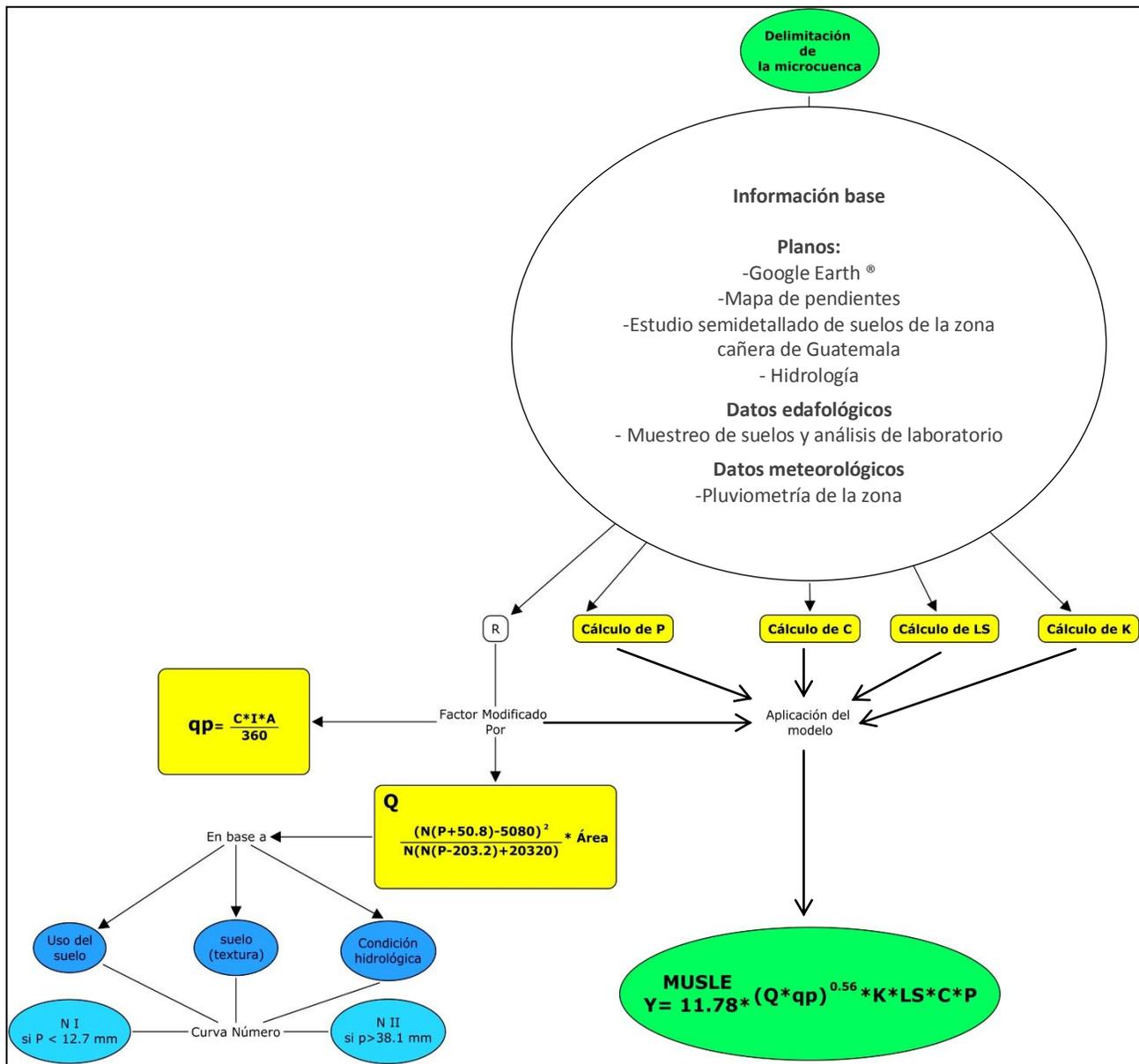
Se utilizó la herramienta SIG ArcGis 10 ® de ESRI, donde se utilizaron las siguientes aplicaciones: ArcMap, ArcToolbox y ArcCatalogo. La información espacial en formato digital empleada como punto de partida se obtuvo de diversas fuentes:

- Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC)
- Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar (CENGICAÑA)
- Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala (FAUSAC)
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA)
- Ingenio Pantaleón

Para la realización de este estudio se contó con datos edafológicos, meteorológicos y también con información existente en diferentes capas digitales (formato shape) todas ellas fueron proyectadas en el sistema de coordenadas WGS84, UTM huso 15 Norte a fin de homogenizar el sistema de proyecciones y poder así trabajar la siguiente información:

- Modelo de elevación digital (DEM, tamaño de celda 15 metros).
- Capa vectorial de polígonos con información sobre los límites de cuencas de la república de Guatemala
- Capa vectorial de polígonos con información del estudio semidetallado de suelos de la zona cañera de Guatemala.
- Capa vectorial de isoyetas de Guatemala
- Muestreo de suelos y análisis de laboratorios
- Pluviometría de la zona (precipitación diaria (mm))

Para implementar la ecuación universal de pérdida de suelo Modificada (MUSLE) en ArcGis 10 ® se calculó por separado cada uno de los factores que la integran mediante una serie de operaciones utilizando la aplicación ModelBuilder, ya que esta permitió crear, editar y administrar modelos, encadenados a una secuencia de herramientas de geoprocésamiento y suministrar la salida de una herramienta a otra herramienta como entrada, en forma de organigrama (Franz, 2012), dando como resultado una capa raster para cada factor. Esto permitió a posteriori operar con todas las capas resultantes para obtener la cartografía de riesgo de erosión potencial y erosión actual. El siguiente esquema muestra a grosso modo el procedimiento llevado a cabo:



**Figura 21: Esquema general de la metodología utilizada en MUSLE**

a. Delimitación de la cuenca

Para delimitar la zona de estudio (cuenca hidrográfica) automáticamente y construir la red hídrica se partió de un modelo de elevación digital (DEM) de tamaño de celda de 15 (metros). Se usaron algunas herramientas de la caja *Hidrology tools*. Fue necesario definir una proyección para el archivo ráster (DEM), desde la caja de herramientas ArcToolbox y la herramienta proyectar ráster. El procedimiento utilizado se detalla en la figura 22.

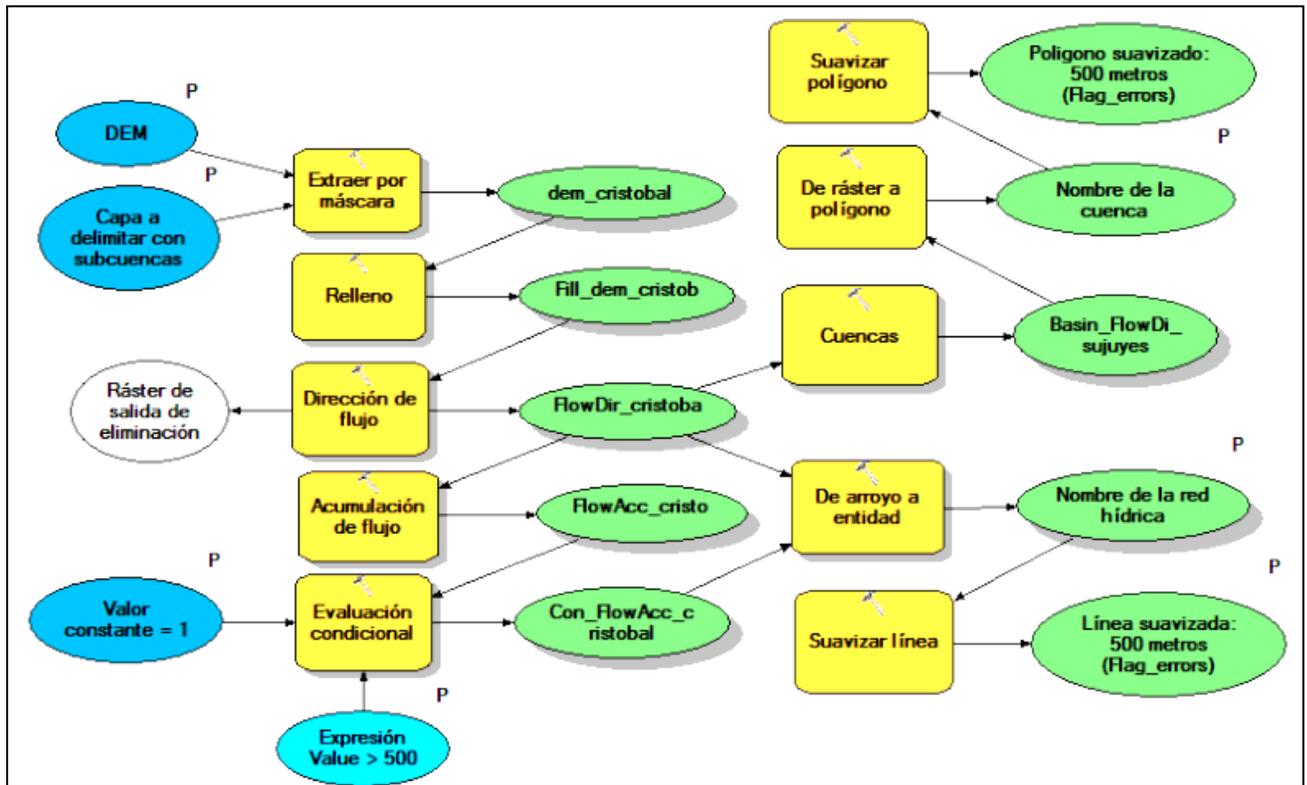


Figura 22: Esquema del flujo de trabajo utilizado para delimitar una cuenca hidrográfica en ArcGis 10.

b. Lámina de suelo erosionado (Y)

$$Y = 11.8(Q * q_p)^{0.56} KLSCP \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde:

- Y = Pérdida media anual del suelo (T/Ha/año)
- K = Factor de erodabilidad del suelo (ton/ha/Unidades de energía)
- L = Factor de longitud de pendiente (Adimensional)
- S = Factor de grado de pendiente (Adimensional)
- C = Factor de cobertura vegetal. (Adimensional)
- P = Factor de prácticas de conservación de suelo. (Adimensional)
- Q = Volumen de escurrimiento (m<sup>3</sup>).
- qp = Escurrimiento máximo instantáneo (m<sup>3</sup>/s).

### Erodabilidad (K)

Se utilizó el método del nomograma (Ver marco teórico), que da los resultados en:

$$K = \frac{MJ}{ha} * \left( \frac{\frac{mm}{hr}}{\frac{ton}{ha}} \right)$$

### Factor topográfico (LS)

Como se explicó anteriormente este factor se calcula a partir de dos subfactores: la inclinación de la pendiente (S) y su longitud (L). Para el cálculo de ambos se utilizó un modelo de elevación digital (DEM) de la zona (ver proceso en figura 23).

Para el factor L (ecuación 2) donde  $\lambda$  es la longitud de la pendiente (metros), m es el exponente de la longitud de la pendiente y  $\alpha$  es el ángulo de la pendiente<sup>1</sup>. La longitud de la pendiente se define como la distancia horizontal desde donde se origina el flujo superficial al punto donde comienza la deposición o donde la escorrentía fluye a un canal definido.

$$L = \left( \frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad m = \frac{F}{(1+F)} \quad F = \frac{\frac{\sin \alpha}{0.0896}}{3(\sin \alpha)^{0.8} + 0.56}$$

Ec. 2                      Ecuación 14: exponente de la longitud (m)

Según Desmet y Govers, 1996, citados por Aquin-Saint Luis du Sud, 2012, el factor L con el área de drenaje aportado es:

$$L = \frac{(A + D^2)^{m+1} - A^{m+1}}{x^m D^{m+2} (22.13)^m}$$

Ecuación 15: factor L con el área de drenaje aportado

Donde “A” es el área aportada unitaria a la entrada de un píxel (celda), “D” es el tamaño del píxel y “x” es el factor de corrección de forma. Las ecuaciones utilizadas para el cálculo del factor L en ArcGis 10 ® fueron:

<sup>1</sup> Cuando se aplica esta fórmula en el Raster Calculator de ArcGis 10 ® se debe tomar en cuenta que el ángulo deberá ser convertido a radianes (1 grado sexagesimal = 0.01745 radianes).

$$F = \frac{(\sin(\text{"\%Pendiente\_grados\_sujuyes\%"} * 0.01745) / 0.0896) / (3 * \text{Power}(\sin(\text{"\%Pendiente\_grados\_sujuyes\%"} * 0.01745), 0.8) + 0.56))$$

$$M = \frac{\text{"\%Factor\_F\%"}}{1 + \text{"\%Factor\_F\%"}}$$

$$\text{Factor L} = \frac{(\text{Power}(\text{"\%FlowAcc\_sujuyes\%"} + 225, (\text{"\%Factor\_m\%"} + 1)) - \text{Power}(\text{"\%FlowAcc\_sujuyes\%"}, (\text{"\%Factor\_m\%"} + 1))) / (\text{Power}(15, (\text{"\%Factor\_m\%"} + 2)) * \text{Power}(22.13, \text{"\%Factor\_m\%"}))$$

El factor S (ecuaciones 3) donde el  $\alpha$  se toma como el ángulo medio a todos los subgrids en la dirección de mayor pendiente, según McCool *et al*, 1987, citado por Aquin-Saint Luis du Sud, 2012.

$$\begin{aligned} S &= 10.8 \operatorname{sen} \alpha + 0.03 & \text{si} & \tan \alpha < 0.09 \\ S &= 16.8 \operatorname{sen} \alpha - 0.5 & \text{si} & \tan \alpha \geq 0.09 \end{aligned}$$

La ecuación utilizada para el cálculo del factor S en ArcGis 10 ® fue:

$$\text{Factor S} = \operatorname{Con}(\tan(\text{"\%Pendiente\_grados\_sujuyes\%"} * 0.01745) < 0.09, (10.8 * \sin(\text{"\%Pendiente\_grados\_sujuyes\%"} * 0.01745) + 0.03), (16.8 * \sin(\text{"\%Pendiente\_grados\_sujuyes\%"} * 0.01745) - 0.5))$$

Una vez hecho lo anterior se aplicó la fórmula de Moore y Burch (1986) para el cálculo del factor LS con la calculadora raster:

$$LS = (Factor L) * (Factor S)$$

Ecuación 16: factor topográfico (LS)

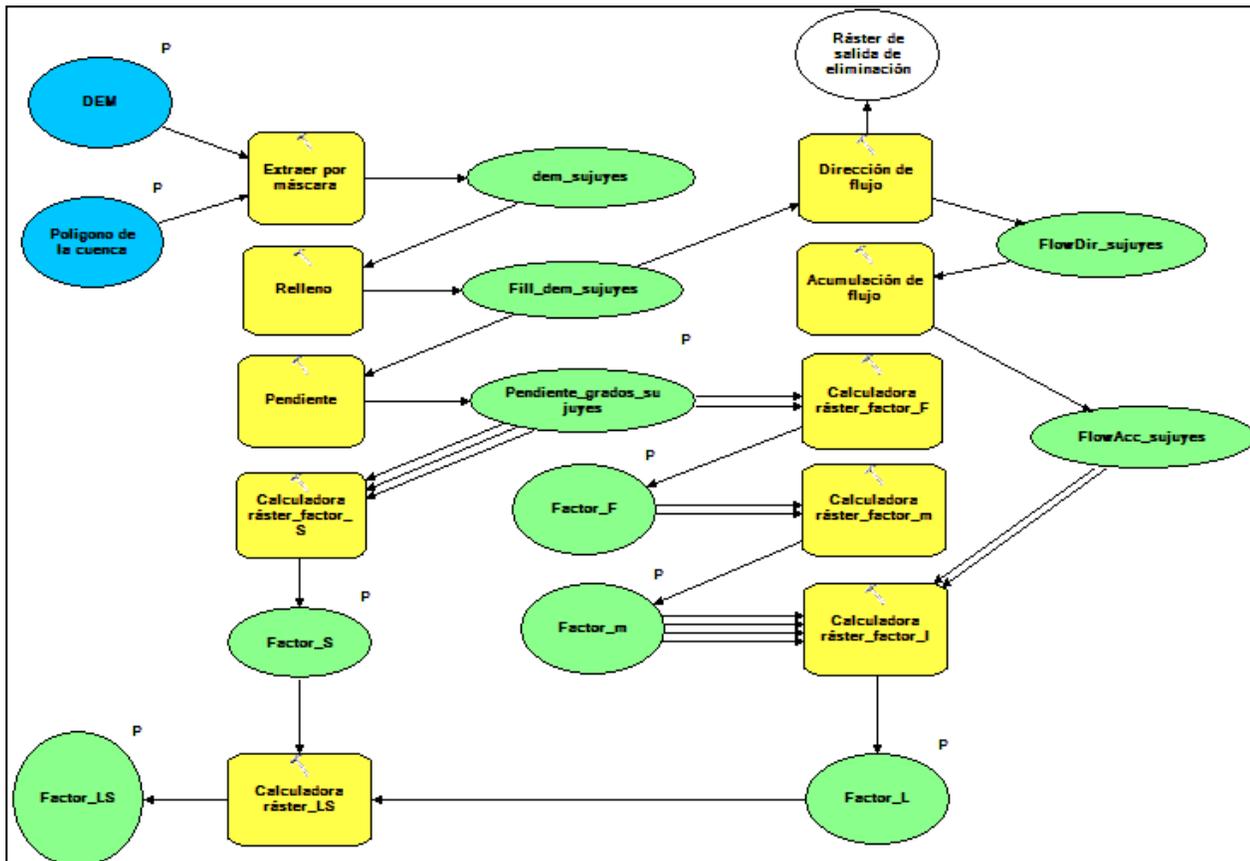


Figura 23: Esquema del flujo de trabajo utilizado para delimitar el factor topográfico (LS) de MUSLE en ArcGIS 10®.

### Cobertura (C)

Para la elaboración del mapa de uso de suelo actual se utilizaron imágenes satelitales de Google Earth, año 2013. Se elaboraron polígonos de acuerdo a cada uso de suelo, posteriormente se realizó una verificación en campo de los usos de suelo presentes. Teniendo el mapa actual de uso de suelo, se asignaron los distintos valores del factor vegetación utilizando para ello diversas fuentes para que el resultado fuese lo más fehaciente posible. Finalmente a partir de la capa de polígono con los valores de C para cada uso del suelo se generó una capa ráster que representara estos valores.

### Prácticas de conservación (P)

Se consultaron los cuadros de prácticas de conservación de suelos ya establecidos, donde existen valores de P, en base a las prácticas de conservación, que se estén practicando dentro del área y que previamente se verificó en el campo. Finalmente a partir de la capa

de polígono con los valores de P para cada uso del suelo se generó una capa ráster que representara estos valores.

### Volumen de escurrimiento (Q)

Para este valor se necesitó información sobre uso del suelo (C), textura del suelo y condición hidrológica, que se ingresan en la siguiente fórmula:

$$Q = A * Q_e$$

**Ecuación 17: Volumen de escurrimiento**

Dónde:

Q= volumen de escurrimiento

A = área del evento en metros cuadrados (m<sup>2</sup>).

Q<sub>e</sub> = lámina de escorrentía en metros (m).

$$Q_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

Dónde:

S = Retención potencial máxima (mm)

P= Precipitación pluvial

$$S = \left( \frac{25400}{N} \right) - 254 \quad \text{Por lo tanto} \quad Q_e = \frac{(N(P+50.8)-5080)^2}{N(N(P-203.2)+20320)} \quad \text{Ecuación 10}$$

Dónde:

Q<sub>e</sub>= Lámina de escorrentía, mm

P= lluvia de duración de 6 horas y determinado período de retorno, mm

N=Curva número

N = Curva Número

NIf (CNII) = si P < 12.7 mm.

NIIIIf (CNII) = si P > 38.1 mm.

### C. Esguerrimiento máximo instantáneo ( $q_p$ )

$$q_p = \frac{C \cdot I \cdot A}{360}$$

Ecuación 5

Dónde:

$q_p$  = Caudal máximo de esguerrimiento ( $m^3/seg$ )

$I$  = Intensidad de lluvia  $mm/hr$  (para el evento, precipitación  $mm/tiempo$  de concentración  $t_c$ )

$A$  = área de la cuenca (Ha)

$C$  = lámina esguerrentía  $mm (Q_e)/lámina$  de precipitación  $mm$

#### 2.5.2 Evaluación de los factores edafoclimáticos en la pérdida de suelo

Para la caracterización edáfica se realizó un muestreo de suelos previo al establecimiento de las parcelas de esguerrimiento, el cual consistió en lo siguiente:

- Se realizó un recorrido por toda la microcuenca, luego se eligieron áreas con características similares como cultivo y pendiente.
- Con la ayuda de una pala se inició haciendo un agujero en el suelo en forma de “V” luego se tomó una muestra homogénea a una profundidad aproximada de 20 centímetros. Los extremos de la submuestra fueron cortados con el machete y se depositaron en una cubeta limpia. Se tomaron de 15 a 20 submuestras por área muestreada. Las submuestras se tomaron cada 15 pasos, siguiendo un zig-zag.
- Luego de tener todas las submuestras en la cubeta se mezclaron homogéneamente y se apartó en una bolsa de nylon aproximadamente dos libras de suelo (muestra compuesta), estas muestras compuestas fueron llevadas al laboratorio agronómico de CENGICANÑA para el análisis físico químico.

- Al obtener los resultados de laboratorio de las muestras se inició con su interpretación y a la determinación de características que describieran los suelos de la microcuenca, dichos resultados fueron comparados con la información generada por CENGICAÑA a través de mapas y shapes, esto para respaldar la información obtenida.

En cuanto a la parte climática se utilizaron los datos de pluviometría de la zona, proporcionada por el ingenio Pantaleón. A partir de dicha información y mediante los datos obtenidos a través de las parcelas de escurrimiento, se procedió a determinar la cantidad de precipitación que escurrió en cada área evaluada y la cantidad que se infiltró (abstracciones) de tal forma que dichos resultados obtenidos a través del método directo se compararon con los resultados obtenidos a través del método indirecto o el método de la curva número del SCS.

### **2.5.3 Identificación de zonas vulnerables a la erosión hídrica**

Esta fase consistió en analizar el problema central (erosión hídrica) y mediante un árbol de problemas se obtuvieron las causas y sus efectos. Luego se construyó una matriz para considerar los factores que intervienen en la erosión de los suelos y así establecer su efecto, ya fuese positivo o negativo, en dicho proceso.

Finalmente se analizó la microcuenca como un sistema productivo con tres subsistemas, para considerar así las mejoras y recomendaciones a seguir.

## 2.6 RESULTADOS

### 2.6.1 Estimación de la pérdida del suelo por erosión hídrica

Los resultados obtenidos sobre la pérdida del suelo por procesos de erosión hídrica se detallan a continuación:

#### A. Estimación de la pérdida del suelo utilizando parcelas de escurrimiento

Se establecieron cuatro parcelas de escurrimiento bajo las diferentes coberturas vegetales que la microcuenca Los Sujuyes abarcó. En el mes de mayo se inició con el trabajo de campo y laboratorio para determinar la cantidad de suelo erosionado por cada evento de lluvia en las parcelas Caña 1, Caña 2 y Eucalipto, respectivamente. En el caso de la parcela de escurrimiento bajo la cobertura de Hule se inició el trabajo en el mes de agosto ya que no fue posible establecer contacto con los administradores de dicho cultivo, por lo que se buscó un sustituto en otra finca cercana (Apéndice, figura 57A). En el cuadro 19 se presentan las características de dichas parcelas de escurrimiento establecidas en la parte alta de la zona cañera guatemalteca, para el año 2013:

**Cuadro 19: Caracterización de parcelas de escurrimiento**

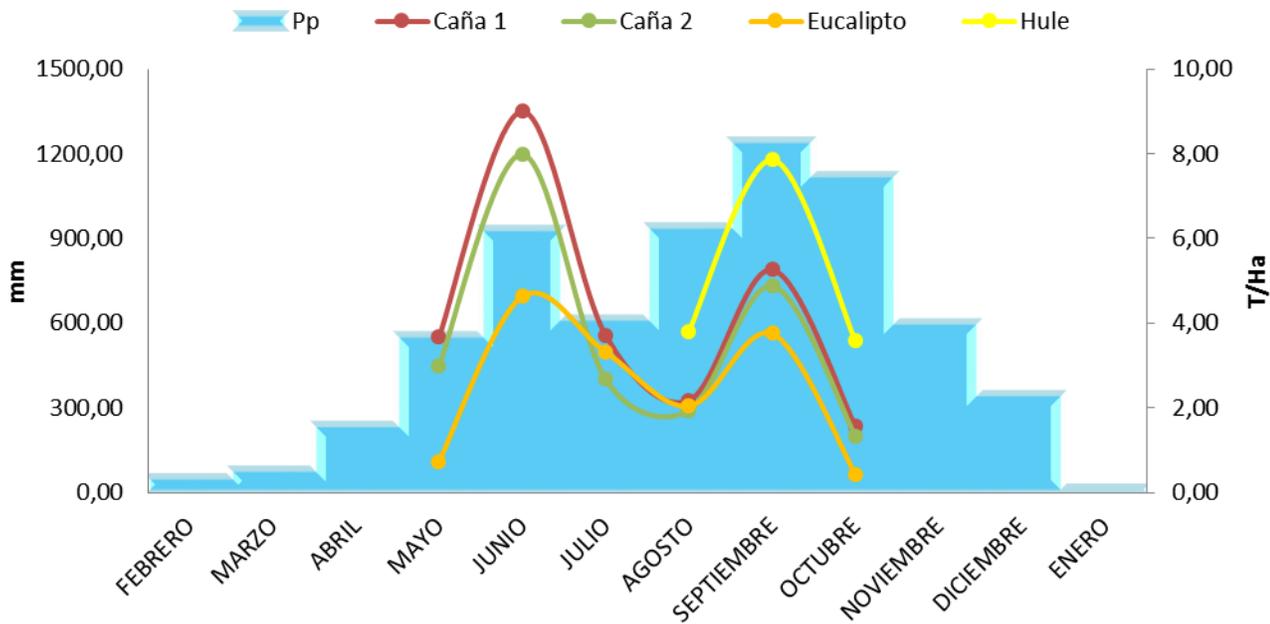
Nombre de la parcela de escurrimiento	Cobertura	Porcentaje de pendiente	Ubicación	
			Latitud	Longitud
Caña 1	Caña de azúcar variedad PR75-2002	12	14°24'21" N	91°01'01" W
Caña 2	Caña de azúcar variedad PR75-2003	9,5	14°24'2.7" N	91°00'58.2" W
Eucalipto	Plantación forestal (árboles de eucalipto de 2.5 años aprox.)	10	14°25'17.7" N	91°0'30.5" W
Hule	Sistema agroforestal (asocios de árboles de hule de 1.5 años aprox. y maíz)	14	14°23'16.63" N	91° 2'8.48"W

En el cuadro 20 se muestra el resumen de los resultados de suelo erosionado en base al peso suelo seco (toneladas/hectárea/mes), considerando los meses de mayo a octubre como meses de época lluviosa, obtenidos en el ensayo con parcelas de escurrimiento.

**Cuadro 20: Cantidad de suelo erosionado mensualmente, microcuenca Los Sujuyes**

Mes	Parcela	Suelo erosionado, T/Ha	Lamina de suelo erosionada, mm/ha
Mayo	Caña 1	3,67	0,27
	Caña 2	2,99	0,22
	Eucalipto	0,73	0,06
Junio	Caña 1	9,00	0,67
	Caña 2	7,99	0,60
	Eucalipto	4,63	0,35
Julio	Caña 1	3,71	0,28
	Caña 2	2,67	0,20
	Eucalipto	3,32	0,25
Agosto	Caña 1	2,17	0,16
	Caña 2	1,94	0,15
	Eucalipto	2,04	0,15
	Hule	3,80	0,33
Septiembre	Caña 1	5,08	0,38
	Caña 2	4,88	0,37
	Eucalipto	3,75	0,28
	Hule	7,86	0,68
Octubre	Caña 1	1,57	0,12
	Caña 2	1,34	0,10
	Eucalipto	0,44	0,03
	Hule	3,59	0,31

De acuerdo a los resultados del cuadro 20 las cantidades de suelo erosionado en las parcelas bajo la cobertura vegetal de caña de azúcar presentan la mayor tasa de erosión en los tres primeros meses. En el mes de Julio la tasa de erosión en el cultivo forestal (eucalipto) supera la tasa de erosión de la parcela de caña 2. Nótese que en el mes de agosto la cantidad de suelo erosionado se reduce en todas las parcelas con las distintas coberturas vegetales y además se tiene el primer dato de erosión para la parcela de hule. A partir del mes de agosto la tasa de erosión del sistema agroforestal (hule y maíz) es superior a la tasa de erosión de las otras tres parcelas. La figura 24 muestra la variación de las cantidades de suelo erosionado (T/Ha) y de la precipitación (mm) para el año 2013.



**Figura 24: variación de las cantidades de suelo erosionado y precipitación, microcuenca Los Sujuyes (2013).**

Como se puede observar en la figura 24, la cantidad de suelo erosionado en las parcelas bajo cobertura de caña de azúcar difiere considerablemente, esto debido a que en estas existe una diferencia de pendiente (caña 1 con 12% y caña 2 con 9.5% de pendiente) además la época de siembra y número de corte en los lotes son distintos.

En el mes de julio la tasa de erosión de la parcela de eucalipto es mayor que la tasa de erosión de la parcela de caña 2, esto se debe principalmente a que a finales del mes de junio se realizó una aplicación de herbicida, como manejo de malezas, lo que influyó en que el sotobosque desapareciera, permitiendo que el impacto de las gotas de lluvia fuese mayor y por lo tanto provocara un aumento en la erosión.

En cuanto a la variación de las cantidades de suelo erosionado en la parcela de hule, cabe destacar que al existir un sistema agroforestal o de asocio con maíz, el suelo está en constante movimiento debido a las prácticas culturales que se le practican a dicho cultivo, además que en estas zonas se sacan dos cosechas de maíz al año lo que se traduce en arado del suelo en plena época lluviosa provocando que el suelo se encuentre suelto y susceptible a la erosión.

Se observa que en el mes de agosto la tasa de erosión se reduce considerablemente a pesar de que la cantidad de lluvia para este mes es superior a los 800 mm, probablemente se deba a que la intensidad de la lluvia haya disminuido como efecto de la canícula, sin embargo no se puede asegurar que la intensidad de la lluvia sea el factor que influyera en la reducción de la tasa de erosión en este mes, debido a que no se cuenta con equipo necesario en la zona para registrar la intensidad de lluvia.

Es importante considerar que las parcelas de escurrimiento no toman en cuenta el efecto de las prácticas de conservación de suelos como las acequias de ladera. En el cuadro 21, se presentan las cantidades brutas de suelo erosionado anualmente. Es decir que si se conociera la cantidad de suelo retenido por las acequias de ladera las cantidades de erosión serían menores en el área de caña de azúcar, ya que se conocería así la erosión neta.

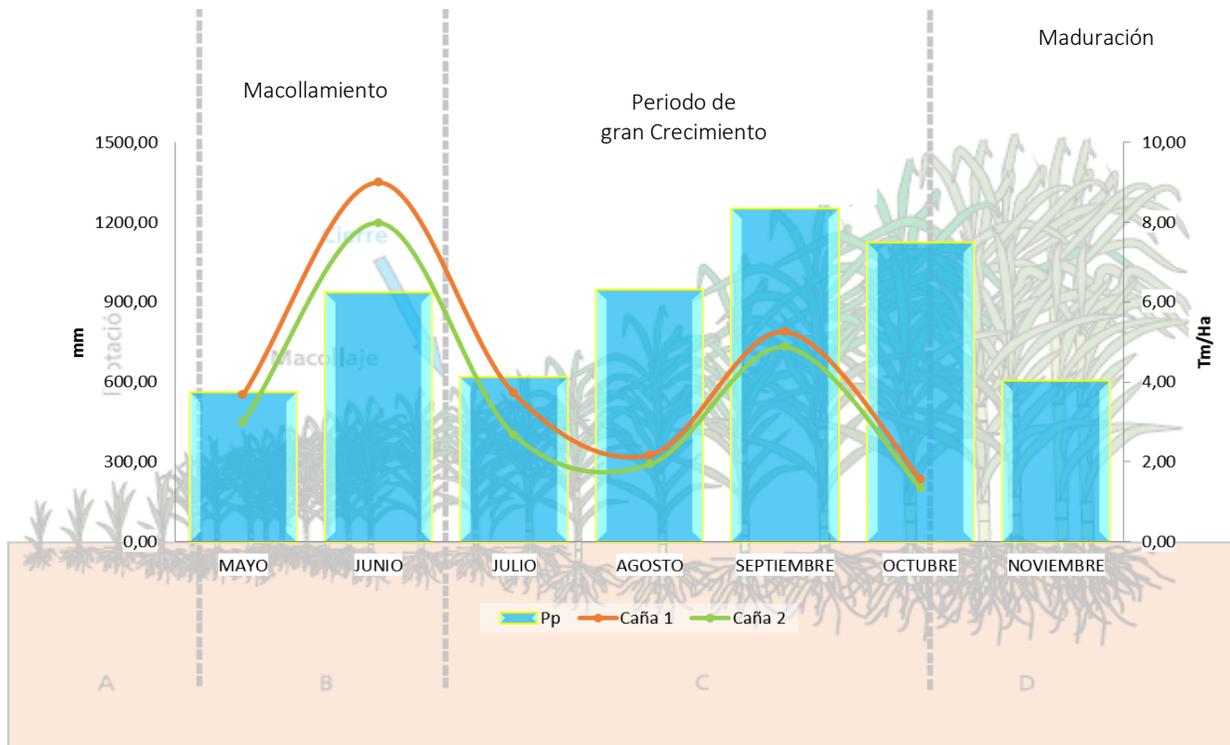
**Cuadro 21: Cantidad de suelo erosionado año 2013, microcuenca Los Sujuyes**

Parcela	Suelo erosionado, T/Ha/año	Lamina de suelo erosionada, mm/Ha/año
Caña 1	25,21	1,88
Caña 2	21,80	1,64
Eucalipto	14,91	1,13
Hule*	15,25	1,32

\* Considerando la tasa de erosión de los meses de agosto, septiembre y octubre.

Los efectos de la erosión hídrica pueden ser reducidos si se consideran otros factores como variedad del cultivo, época de siembra, manejo de malezas y prácticas de conservación de suelos, que en conjunto contribuyan a reducir la degradación de los suelos por erosión hídrica. En la figura 25 se tiene un claro ejemplo, ya que así como el Ingenio Pantaleón considera las épocas tanto de siembra como de corte del cultivo de caña, de tal forma que cuando inicia la época lluviosa el suelo se encuentra con cobertura vegetal y cuando las lluvias aumentan el cultivo ya se encuentra en su fase de cierre, según etapa fenológica, además de que las acequias de ladera contribuyen, no solo a

retener suelo erosionado de lotes vecinos, sino que reducen la longitud de pendiente y conducen el exceso de escorrentía a drenajes naturales.



**Figura 25: Comportamiento de la erosión hídrica en el cultivo de caña de azúcar. Relación erosión-fenología-precipitación, Año hidrológico 2013. Fondo: Romero, Digonzelli y Scandaliaris 2009.**

Este sistema de producción de caña de azúcar integra varios factores que contribuyen a la protección de los suelos de la parte alta de la zona cañera. Como se puede observar en la figura 25, los primeros tres meses son los que presentan una tasa de erosión mayor debido a que los suelos se encuentran secos y sueltos, lo que los hace susceptibles a la erosión hídrica provocada por las primeras lluvias, sin embargo para esta fecha el suelo cuenta con la protección del cultivo en sus primeras fases fenológicas y el suelo erosionado es retenido en las acequias de ladera.

A pesar que a partir del mes de agosto las precipitaciones son mayores las cantidades de suelo erosionado son menores que los primeros tres meses de la época lluviosa debido fundamentalmente al estado fenológico del cultivo.

## B. Modelación de la erosión hídrica en la microcuenca Los Sujuyes utilizando un sistema de información geográfica.

Para el cálculo de los dos escenarios de la erosión hídrica (erosión potencial y erosión actual o del año 2013), se utilizaron los mismos valores de los factores K y LS. El factor de escurrimiento ( $Q \cdot q_p$ ), que proporciona una fuente de energía (Román Ortíz, 2010) de la lluvia que sustituye al factor R de USLE -energía utilizada para desprender y transportar partículas de suelo (Argota Quiroz, 2011)-, calculado para el año 2013 también se utilizó para determinar la erosión potencial.

**Factor de cobertura (factor C):** para la asignación de los distintos valores del factor vegetación se utilizaron diversas fuente (cuadro 22) para que el resultado fuese lo más fehaciente posible.

**Cuadro 22: valores del factor C asignados al tipo de cobertura presente en la microcuenca Los Sujuyes (2013)**

Valor	Promedio	Cultivo	Referencia Bibliográfica
0,560	<b>0,2258</b>	Caña de azúcar	Guzmán, Isidro. 2012
0,263			Lianes, E. <i>et al.</i> 2009
0,001			Ríos, Javier. 2012
0,040			Ibáñez, S. <i>et al.</i> 2012
0,265			Uribe, Cecilia. 2012
0,120	<b>0,0602</b>	Hule	Medina, Camilo. 2009
0,080		Hule	
0,040		bosque	FAO. 1979
0,020		Bosque mixto	Gaspari, F. <i>et al.</i>
0,041		bosque mixto	Dumas, África. 2012
0,006	<b>0,0347</b>	Eucalipto	Clérici, C. Garcís, F. 2001
0,001		bosque latifoliado	Ávalor, Osca. <i>Et al.</i> 2007
0,080		Bosque	
0,080		Eucalipto	Domingo, Juan. 2010
0,040		Bosque	FAO. 1979
0,001		Eucalipto	INTA. 2010

**Factor de erodabilidad del suelo (factor K):** los valores asignados para este factor se obtuvieron a partir de medidas realizadas en trabajo de campo, los cuales fueron comparados con el estudio semidetallado de suelos de la agroindustria azucarera guatemalteca (CENGICAÑA, 1996) y así se asignaron los valores de erodabilidad a partir del tipo de suelo existente en la zona.

**Factor topográfico (factor LS):** como se explicó anteriormente (metodología) este factor se calculó a partir de dos subfactores: inclinación (S) y su longitud (L) obtenido así el mapa con los valores del factor topográfico (figura 26).

**Factor de conservación (factor P):** debido a que este factor representa el efecto de prácticas de conservación de suelos como cultivos en contorno, curvas a nivel, acequias de ladera, etc, su valor depende de la pendiente del terreno, se obtuvieron los valores de tablas elaboradas a partir de ensayos experimentales (INETER y COSUDE 2005). Los valores del factor P utilizados para el cultivo de caña de azúcar se presentan en el cuadro 23 y figura 27, para terrazas o acequias de retención (a nivel) ya que según INETER y COSUDE, 2005, las terrazas de retención teóricamente retienen toda la escorrentía y suelo removido.

**Cuadro 23: Valores del factor P para terrazas de gradientes (de drenaje) y acequias de ladera**

Gradiente de pendiente (%)	Valor de P	Máxima longitud de pendiente entre terrazas (m)
1 - 2	0.05	80
3 - 8	0.05	35 - 50
9 - 12	0.08	25
13 - 16	0.12	15
17 - 20	0.15	12
21 - 25	0.20	10
26 - 30	0.35	8
31 - 35	0.50	8

Fuente: INETER y COSUDE, 2005

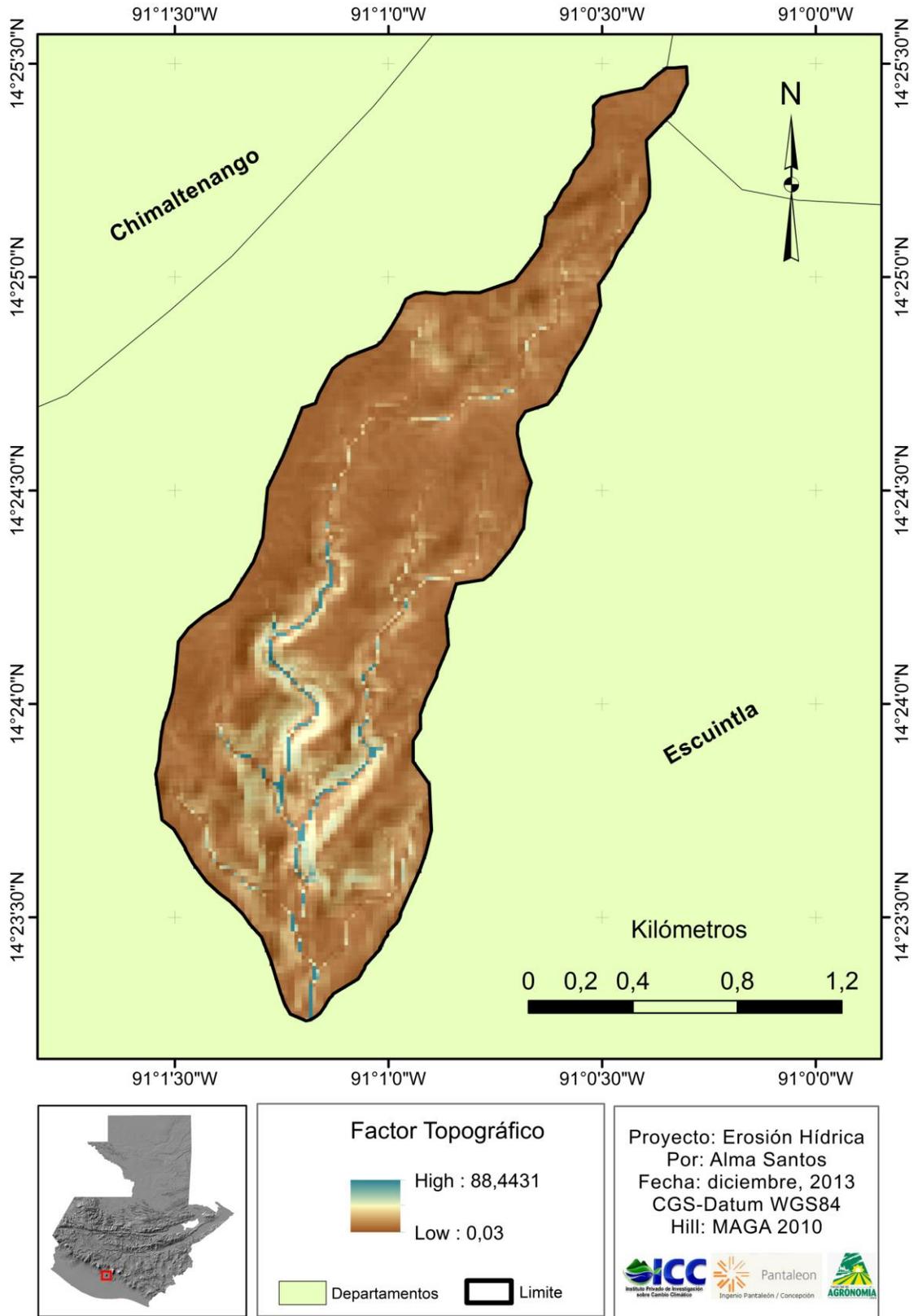


Figura 26: Mapa del factor topográfico (factor LS), microcuenca Los Sujuyes (2013)

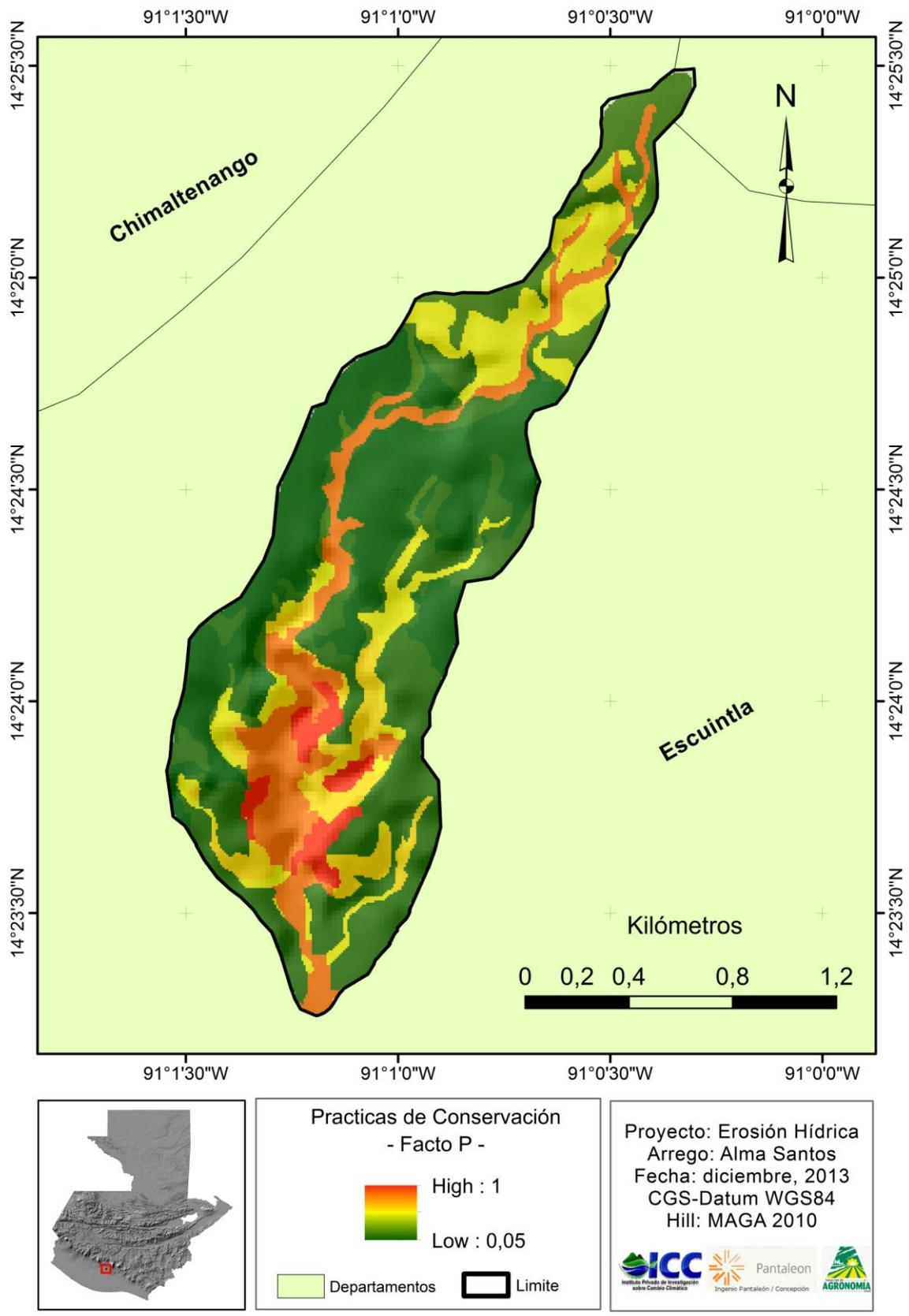


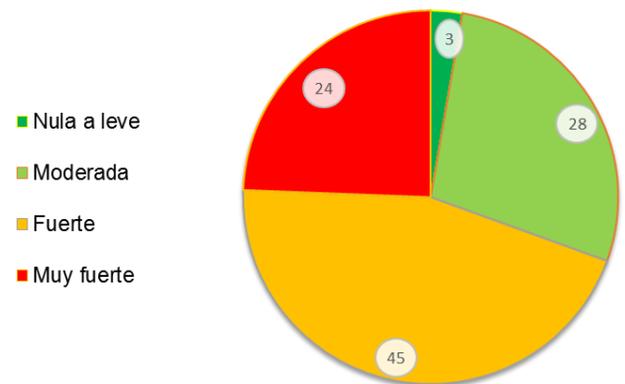
Figura 27: Mapa del factor de Conservación (factor P), microcuenca Los Sujuyes (2013)

Para calcular la erosión hídrica potencial y la actual se utilizó el álgebra de mapas con el módulo de *calculadora ráster*, introduciendo las capas raster de los factores  $Q^*q_p$ , K, C, P y LS u obviando los factores P y C para la erosión potencial.

**Erosión hídrica Potencial:** Con los valores obtenidos del ráster se generó el mapa de erosión potencial para la Microcuenca Los Sujuyes (figura 29) y se clasificó la tasa de erosión según la FAO (1997), cuadro 24.

**Cuadro 24: Tasa de erosión hídrica potencial**

Nivel de erosión	T/Ha/Año	Área (Ha)	Porcentaje
Nula a leve	< 10	8,65	3
Moderada	10 - 50	88,86	28
Fuerte	50 - 200	143,86	45
Muy fuerte	> 200	77,85	24
Total		319,22	100



**Figura 28: Porcentajes de erosión hídrica potencial, según área, microcuenca Los Sujuyes**

La MUSLE indica que al no tener cobertura vegetal y prácticas de conservación de suelos durante todo el año, el 45% de su superficie perdería de 50 a 200 T/Ha/año de suelo, es decir que el 143.86 hectáreas es susceptible a sufrir erosión fuerte, mientras que el 24% de superficie es susceptible a sufrir una erosión muy fuerte, la cuál según la FAO (1997), equivaldría perder más de 200 T/Ha/año de suelo.

Cabe destacar la importancia que tiene la presencia de altos niveles de erosión cerca de los ríos del área en estudio (figura 29), ya que esta de corresponderse con la erosión real que podría afectar negativamente debido al aporte de sedimentos. Por lo que se trata de zonas excesivamente sensibles a la erosión.

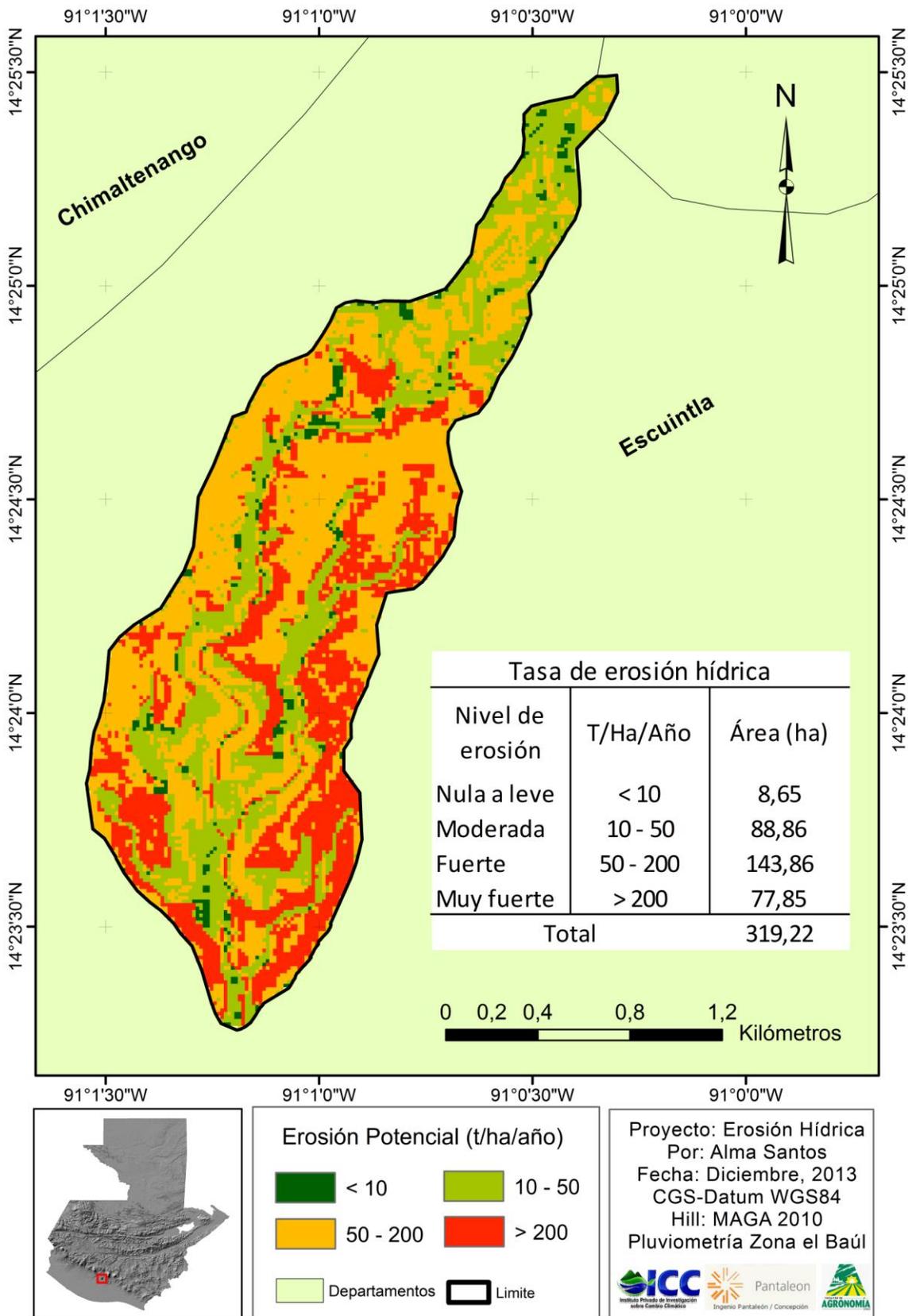
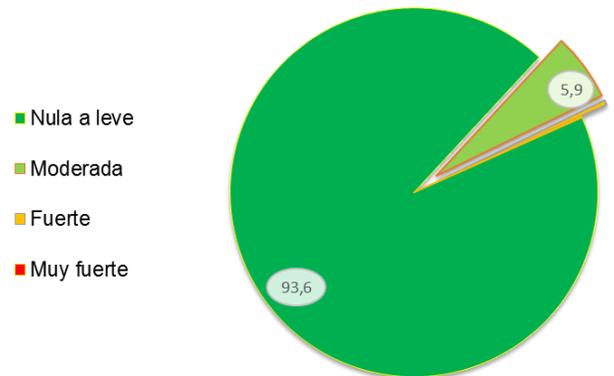


Figura 29: Mapa de erosión potencial, microcuenca los Sujuyes (2013)

**Erosión hídrica actual:** a diferencia de la erosión potencial, en el escenario de la erosión actual se evaluó el efecto de la cobertura vegetal y de las prácticas mecánicas de conservación de suelos (como las acequias de ladera y cultivos a curvas a nivel). La clasificación de rangos, es la propuesta por la FAO (1997) y se muestra en la figura 30 y cuadro 25.

**Cuadro 25: Tasa de erosión hídrica actual**

Nivel de erosión	T/Ha/Año	Área (Ha)	Porcentaje
Nula a leve	< 10	298,77	93,6
Moderada	10 - 50	18,86	5,9
Fuerte	50 - 200	1,33	0,4
Muy fuerte	> 200	0,26	0,1
Total		319,22	100



**Figura 30: Porcentaje de erosión hídrica actual (2013), microcuenca Los Sujuyes**

Según PRODESNOs (2011) Y Morgan R.P.C (2006) citado por Dumas Salazar (2012); la tasa máxima permisible, cuando se habla de erosión del suelo es de 10 toneladas/hectárea/año, ya que se calcula que esta es la velocidad a la que el suelo se genera, por lo que todo territorio cuyas pérdidas de suelo no superen las 10 T/Ha/año no presentarán pérdidas netas debido a la erosión. Y como se observa en la figura 30 aproximadamente el 94% de la superficie (298.77 ha), presenta una tasa de erosión menor al 10 T/Ha/año, esto gracias a la protección que supone la cobertura del suelo y las prácticas mecánicas con las que cuenta el área de cultivo anual (acequias de ladera y cultivos a curvas a nivel), el cultivo forestal y el bosque mixto (curvas a nivel).

Además se observan diferencias espaciales muy notables en los mapas de erosión potencial (figura 29) y erosión actual (figura 31) ya que para este año, la tasa de erosión es mucho menor en toda la cuenca, lo que corrobora que la cobertura vegetal y las prácticas mecánicas de conservación de suelos, realizan un papel fundamental como protector frente a la erosión.

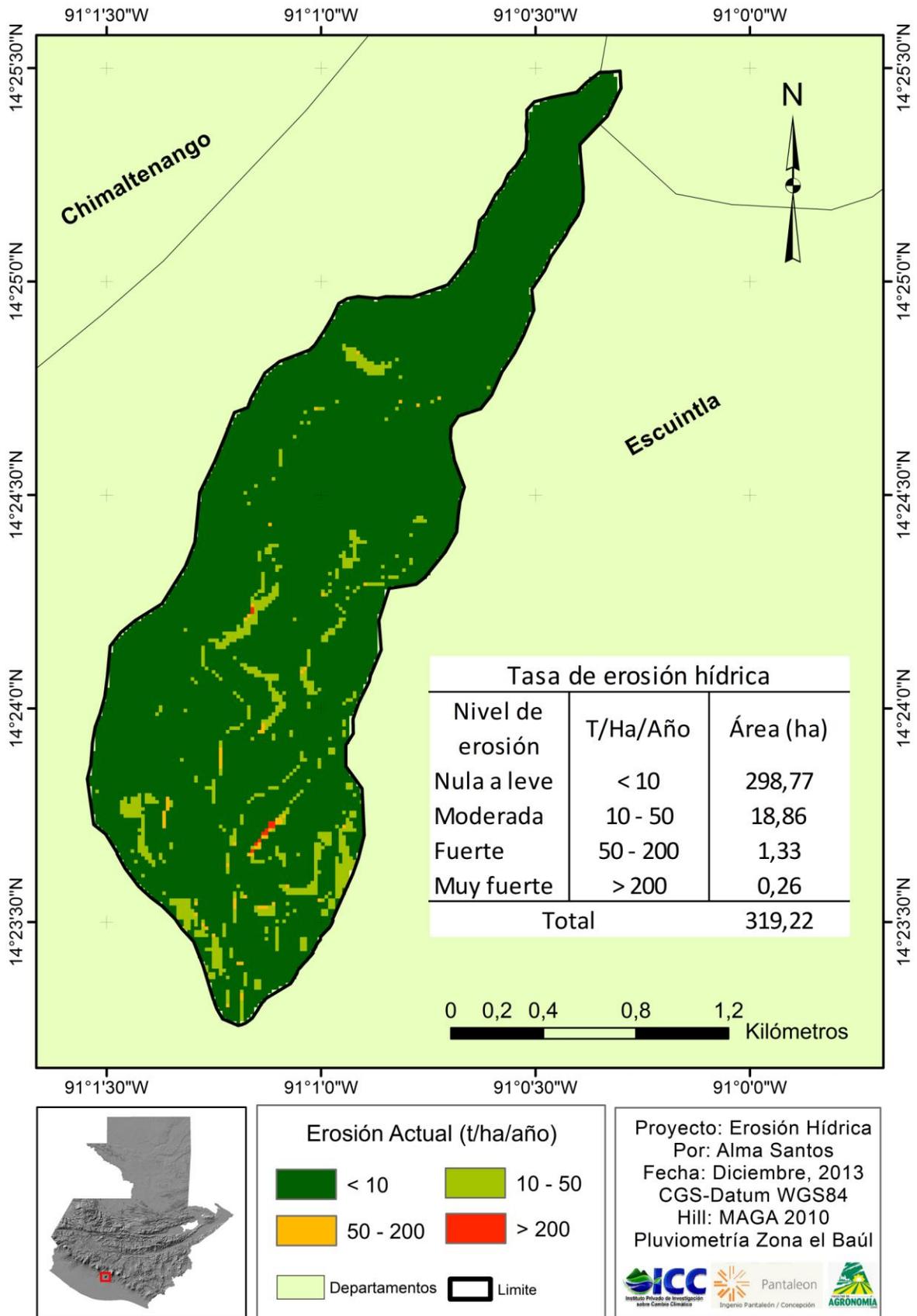


Figura 31: Mapa de erosión hídrica actual, microcuenca Los Sujeyes (2013)

### C. Comparación del método directo (parcelas de escorrentía) y del método indirecto (MUSLE) para la estimación de suelo erosionado por erosión hídrica

A fin de comparar los valores de erosión hídrica estimados por los métodos directo e indirecto, para cada evento de lluvia de los meses de mayo a octubre, fue necesario compararlos por mes. Los resultados se muestran en el cuadro 26. Esto para evaluar la precisión del método indirecto (validación). Ya que los métodos directos como el usado en este estudio, parcelas de escurrimiento, proporcionan datos precisos, pero son laboriosos, requieren mucho tiempo y son costosos. Mientras que los métodos indirectos como modelos matemáticos como, MUSLE, para evaluar la tasa de erosión son relativamente fáciles de aplicar, pero su precisión no ha sido ampliamente validada para los diferentes usos de suelo.

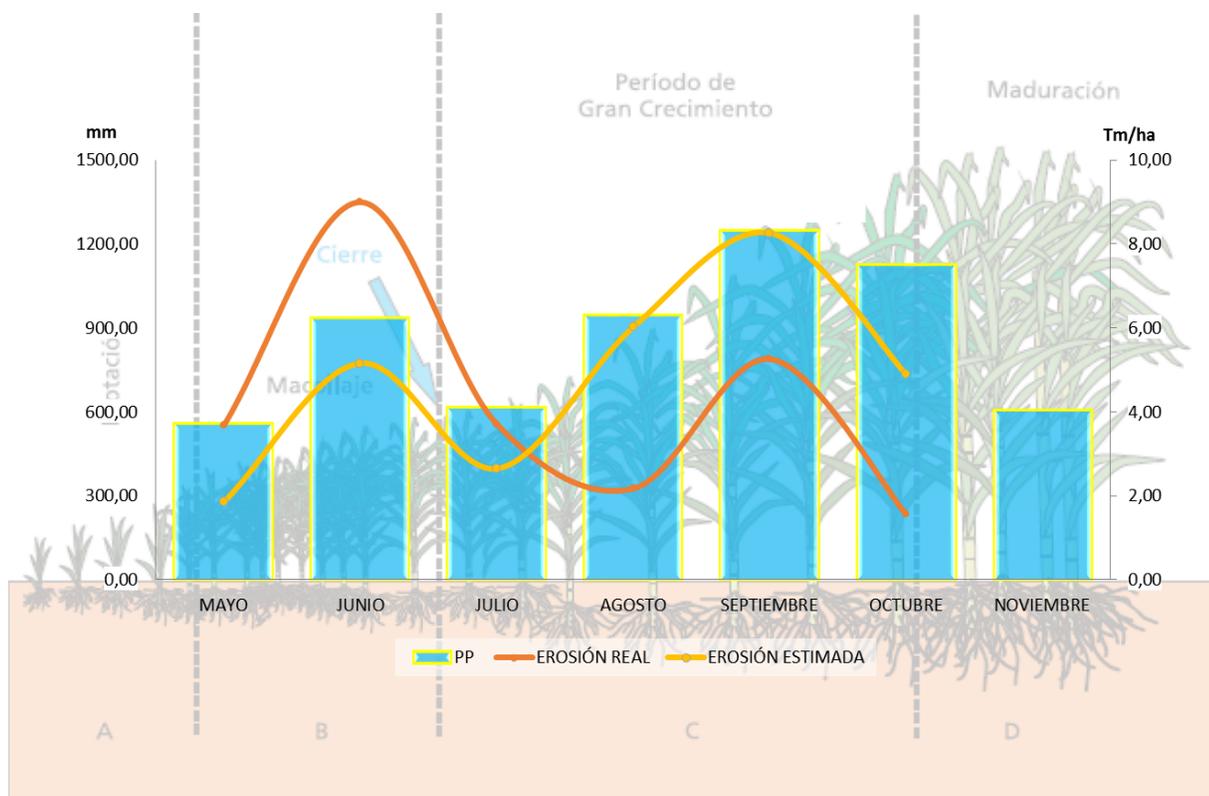
**Cuadro 26: Tasas de erosión de suelo estimadas por MUSLE (T/Ha) en comparación con las tasas reales de erosión (T/Ha) obtenidas a través de las parcelas de escurrimiento, microcuenca Los Sujuyes 2013**

Mes	Pp * (mm)	Cultivo anual (caña de azúcar)		Cultivo forestal (Eucalipto)		Sistema agroforestal (hule en asocio con maíz)	
		Erosión real	Erosión estimada	Erosión real	Erosión estimada	Erosión real	Erosión estimada
Mayo	559,00	3,67	1,85	0,73	0,92	ND**	2,76
Junio	935,00	9,00	5,16	4,63	3,00	ND**	6,75
Julio	616,00	3,71	2,65	3,32	1,47	ND**	3,55
Agosto	944,00	2,17	6,02	2,04	4,77	3,80	9,47
Septiembre	1247,00	5,26	8,27	3,75	5,29	7,86	11,82
Octubre	1123,00	1,57	4,90	0,44	2,28	3,59	5,89
Total	5424,00	25,38	28,83	14,91	17,73	15,25	40,23

ND\*\* = datos no determinados.

Pp\* = datos de pluviometría proporcionados por el ingenio Pantaleón, zona el Baúl

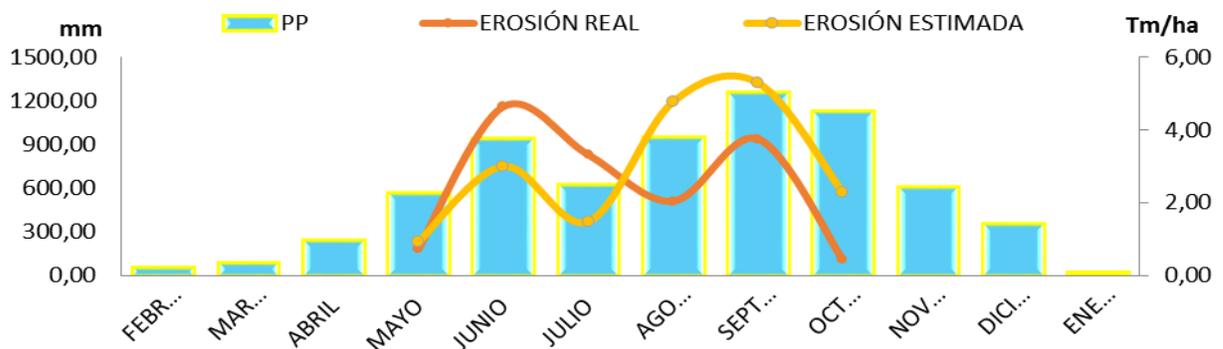
Los datos del cuadro 26, muestran diferencias significativas entre las tasas de erosión obtenidas por el método directo y el método indirecto. Las variaciones tanto de la tasa de erosión y precipitación de los meses de época lluviosa, se observan en las siguientes gráficas:



**Figura 32: Variación de las tasas de erosión hídrica (T/Ha/mes), precipitación (mm) y desarrollo del cultivo de caña de azúcar a lo largo del periodo de época lluviosa 2013. Fondo: Romero, Digonzelli y Scandaliaris 2009.**

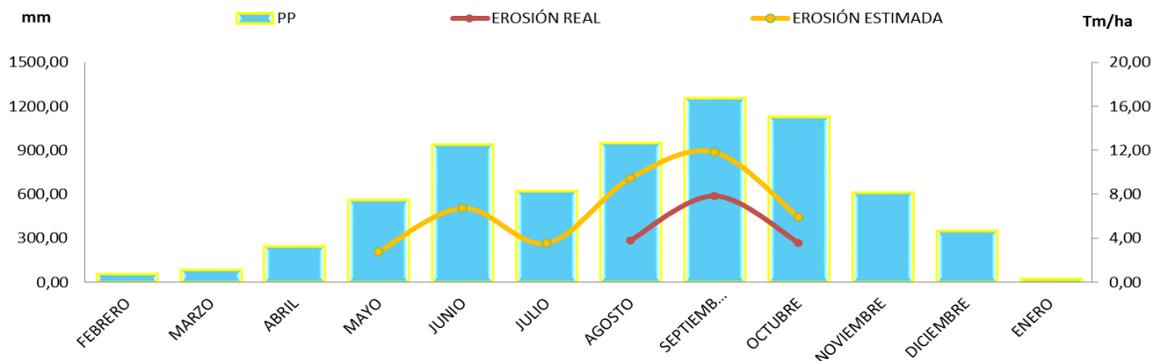
En los primeros tres meses de época lluviosa la MUSLE subestima las tasas de erosión, mientras que a partir de agosto sucede lo contrario, es decir, sobreestima las tasas de erosión. Esto puede deberse a que la MUSLE, sigue la tendencia de las precipitaciones, podría considerarse una relación de erosión-precipitación como directamente proporcional; por otro lado la MUSLE no toma en cuenta, en este caso, el desarrollo del cultivo (fenología), ya que en los meses de altas precipitaciones el cultivo a llegado a su etapa de cierre y maduración respectivamente, por lo que la tasa de erosión se reduce a pesar de que las precipitaciones son mayores, considerando la relación de precipitación- erosión-fenología del cultivo, en donde el factor fenología cumple un papel fundamental en cuanto a la protección del suelo. Según la FAO, 1997, para prever esta posibilidad, del periodo vegetativo se puede dividir en varios periodos los valores de C y calcularlos para cada uno de ellos. En términos generales la MUSLE sobreestimó en promedio las tasas de erosión hídrica en un 14% aproximadamente.

Cuando se comparó la tasa de erosión hídrica obtenida a través del método directo y del método indirecto en el área bajo cobertura de cultivo forestal (eucalipto) se observaron las mismas condiciones que en el cultivo de caña de azúcar, ya que existe un periodo dónde la MUSLE subestima los datos de erosión y a partir de agosto los sobreestima (figura 33). Uno de los factores que influyó en que la tasa de erosión hídrica real u obtenida a través del método directo, fue el manejo de malezas en plena época lluviosa, ya que esta maleza es parte del sotobosque que contribuye a proteger el suelo en la parte más baja de la superficie del suelo.



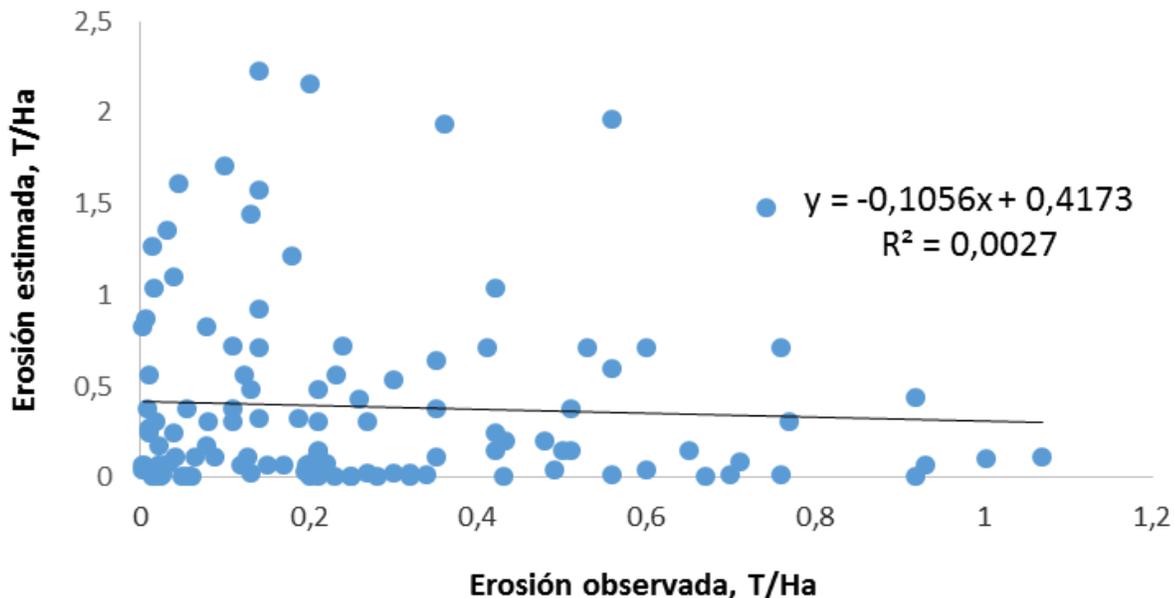
**Figura 33: Variación de las tasas de erosión hídrica (T/Ha/mes), precipitación (mm) y efecto del control de malezas a lo largo del periodo de época lluviosa 2013.**

En el caso del sistema agroforestal evaluado, las tasas de erosión estimadas por la MUSLE son mayores a las tasas de erosión obtenidas por el método directo, es decir que la MUSLE sobreestima estos valores durante los meses evaluados. La variación de las tasas de erosión hídrica y precipitación se observan en la figura 34.



**Figura 34: Variación de las tasas de erosión hídrica (T/Ha/mes), precipitación (mm) y sistema agroforestal de asocio de hule con maíz a lo largo del periodo de época lluviosa 2013.**

Al realizar el análisis de regresión, se observó que no existe relación lineal entre los datos de erosión obtenidos a través de MUSLE y las parcelas de escurrimiento, comportamiento que se observa en la siguiente gráfica (figura 35).



**Figura 35: Regresión lineal. Erosión observada Vrs. Erosión estimada**

Debido a que la MUSLE es una modificación de la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS), original, se puede considerar lo que la PHI-LAC (2010) explica: “A pesar de su relativa robustez predictiva, la USLE es muchas veces mal utilizada en los trópicos, generando predicciones incorrectas. Los principales problemas de utilización de la ecuación son: i) aplicación en situaciones donde sus factores no pueden ser determinados de datos con razonable predicción; ii) aplicación de la ecuación en cuencas complejas utilizando los promedios de longitud e inclinación de laderas y valores promedios de K y C; iii) utilización indiscriminada de los factores C y P sin considerar las limitaciones de longitud de laderas; y iv) utilización de la ecuación en situaciones donde hay cárcavas y/o deposición de sedimentos”

Además según la FAO (1997), las primeras veces que se intentó aplicar la EUPS o EUSLE en los trópicos, se llegó a predicciones alarmantemente elevadas de pérdida de suelo, la razón de esto era que la base de datos de los valores de la energía de las precipitaciones

obtenidos en los Estados Unidos no abarcaban las elevadas intensidades de las lluvias tropicales y la extrapolación dio motivo a crasos errores”. Por lo que pudiera ser el factor de escurrimiento ( $Q \cdot q_p$ ) de MUSLE, que sustituye el factor R de USLE, el causante de que las predicciones no se hayan acercado a los valores del método directo (datos observados).

Según Alfaro S. y Palacios A. (1991) citados por Arana, G. (1992) aplicando la ecuación universal de pérdida de suelo y observaciones de campo, para evaluar el proceso de erosión en la microcuenca quebrada Pital, en Puriscal, Costa Rica, encontraron que en la mayoría de las Áreas donde el trabajo de campo demostró un proceso erosivo muy avanzado, no correspondía a las áreas que según la ecuación universal de pérdida de suelo tenían una tasa de pérdida de suelo muy alta. El autor atribuye esta discrepancia a que el modelo utilizado, fue desarrollado y calibrado para otras condiciones de clima, pendiente, topografía, suelo, manejo y uso de suelo, diferentes a las condiciones del área de estudio. Mientras que otros autores como Vahrson W. G. y Cervantes C. (1991) han criticado a la ecuación universal de pérdida de suelo por sobreestimar las tasa de pérdidas de suelo al hacer comparaciones con mediciones directas en parcelas de escorrentía; Según Arna, G. (1992) el modelo puede utilizarse para identificar áreas críticas susceptibles al proceso de la erosión hídrica.

### **2.6.2 Evaluación de los factores edafoclimáticos en la pérdida de suelo**

Los resultados del análisis físico realizado por el laboratorio agronómico de CENGICAÑA, de las muestras de suelo obtenidas al inicio del ensayo con parcelas de escurrimiento de la microcuenca Los Sujuyes, muestran que los contenido de materia orgánica corresponden al rango de contenido medio (3% a 5%, ver cuadro 27), por lo que según CENGICAÑA (2012) es común encontrar esta cantidad de materia orgánica en suelos Inceptisoles y Mollisoles del estrato bajo y en Andisoles derivados de ceniza volcánica reciente del estrato alto o pie de monte. Estos contenidos de materia orgánica, son fundamentales en el suelo ya que además de contribuir con nutrielementos para el cultivo también actúan en conjunto con los materiales minerales de arcilla como agentes

cementantes del suelo, contribuyendo así a la estabilidad de los conglomerados de suelo y reduciendo la tasa de erosión de los suelos.

**Cuadro 27: Resumen de resultados de análisis físico de suelos**

Parcela	Composición granulométrica				D.AP g/cc	Índices de humedad			Composición volumétrica			Erodabilidad t/ha.MJ*ha/mm*hr
	Arcilla %	Limo %	Arena %	Tipo de Textura		15 ATM. %H	1/3 ATM. %H	Agua disponible %	Minerales %	Porosidad %	M.O %	
Caña 2	5.74	10.83	83.43	Arena Franca	1.33	7.86	17.34	9.48	48.04	48.76	3.21	0.042
Caña 1	5.87	10.73	83.40	Arena Franca	1.34	9.21	15.40	6.18	48.67	48.33	3.00	0.042
Hule	3.94	10.63	85.44	Arena Franca	1.15	11.73	18.76	7.04	40.24	55.63	4.13	0.041
Eucalipto	3.94	6.48	89.58	Arena	1.32	6.26	15.77	9.51	47.67	49.33	3.00	0.040

Fuente: Adaptado de resultados de análisis físico de suelos. Laboratorio agronómico de CENGICAÑA. 2013

Además dentro de las características físicas obtenidas en los análisis, se obtuvo la clase textural de los suelos, las cuales concuerdan con el mapa textural de la zona cañera de Guatemala elaborado por CENGICAÑA (2006) los cuales corresponden a la clase textural arena franca, siendo una textura gruesa (cuadro 28).

Según Boyoucos citado por Arana (1992), la erodabilidad de los resultados es directamente proporcional a los porcentajes de arena más limo, e inversamente proporcional a los porcentajes de arcilla, sin embargo los suelos de textura gruesa tienen una mayor permeabilidad y por lo tanto, una probabilidad inferior de tener escorrentía superficial y erosión hídrica (Escalante 2005). Además Parente *et al* (2002), citado por Escalante (2005), dice que de la misma manera, se estima que las partículas gruesas tendrán menos desplazamiento durante el salpicamiento de las gotas, y en caso de tener algún transporte por las aguas de escorrentía, sedimentarán más rápidamente que las partículas finas.

**Cuadro 28: Valores de erodabilidad en función de la clase textural**

<b>Textura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valores de K</b>
<b>Textura Gruesa</b>	Menor del 18% de arcilla y mayor de 65% de arena	0.05 - 0.2
<b>Textura Mediana</b>	Menor de 35% de arcilla y menor de 65% de arena o menor de 18% de arcilla y menor de 82% de arena	0.25 - 0.4
<b>Textura Fina</b>	Mayor de 35% de arcilla	0.05 - 0.15

Fuente: adaptado de Miliarium, 2003 y Escalante, S. 2005.

El porcentaje de porosidad va de 40 a 50% aproximadamente. Esta propiedad afecta directamente la permeabilidad (movimiento interno del agua en el suelo), la infiltración (penetración del agua en el suelo), la aireación y la capacidad de retención del agua del suelo (Valverde 2007). Según Valverde (2007), la velocidad de infiltración del agua depende de la clase textural del suelo, en términos medios la velocidad de infiltración presenta valores muy variables en espacio y en el tiempo, siendo menor en texturas pesadas o arcillosas (1 a 12 mm/hr) y mayor en texturas gruesas o arenosas (25 a 50 mm/hr).

Esto explica la cantidad de precipitación que es considerada como abstracciones o pérdidas, las cuales incluyen, primordialmente, el agua absorbida por la infiltración y con menor importancia la intercepción y la retención superficial; estas contribuyen a que la escorrentía sea menor.

Cuando todo el sistema poroso del suelo se satura (incluyendo macroporos), el exceso de agua escurre en sentido de la pendiente (Núñez Solís 2001), esto se refleja en los resultados de escorrentía (mm) obtenidos a través de las parcelas de escurrimiento y el método de la Curva Número del SCS.

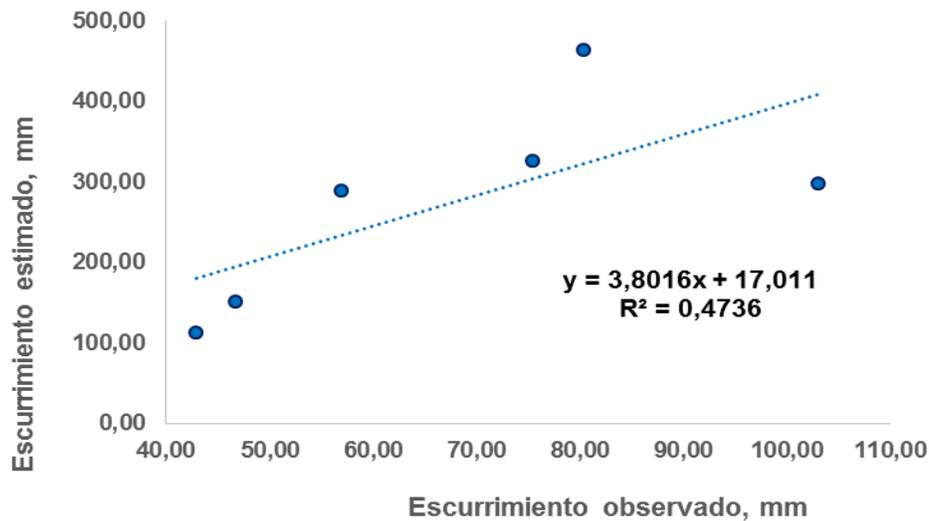
**Cuadro 29: Escorrentía superficial estimada mediante el método directo y el método indirecto**

Nombre	Mes	Pp (mm)	Método indirecto		Método directo	
			Vol. Escurrimiento (mm)	Erosión estimada (T/Ha)	Vol. Escurrimiento (mm)	Erosión Real (T/Ha)
Hule	Mayo	559.00	63.24	2.76	---	---
	Junio	935.00	141.07	6.75	---	---
	Julio	616.00	75.77	3.55	---	---
	Agosto	944.00	186.18	9.47	56.98	3.80
	Septiembre	1247.00	245.31	11.82	132.46	7.86
	Octubre	1123.00	129.17	5.89	82.38	3.59
Eucalipto	Mayo	559.00	28.23	0.92	9.94	0.73
	Junio	935.00	79.72	3.00	52.90	4.63
	Julio	616.00	41.48	1.47	32.81	3.32
	Agosto	944.00	119.51	4.77	50.77	2.04
	Septiembre	1247.00	141.56	5.29	67.15	3.75
	Octubre	1123.00	64.58	2.28	14.19	0.44
Caña	Mayo	559.00	112.82	1.85	42.88	3.67
	Junio	935.00	297.59	5.16	57.86	9.00
	Julio	616.00	151.77	2.65	46.70	3.71
	Agosto	944.00	326.69	6.02	75.43	2.17
	Septiembre	1247.00	463.89	8.27	80.34	5.26
	Octubre	1123.00	289.73	4.90	56.86	1.57

Al realizar el análisis de regresión lineal, se determinó que la cantidad de escorrentía (en mm) obtenida por MUSLE (según método de curva número) sobreestima la cantidad de escorrentía obtenida por medio de las parcelas de escorrentía.

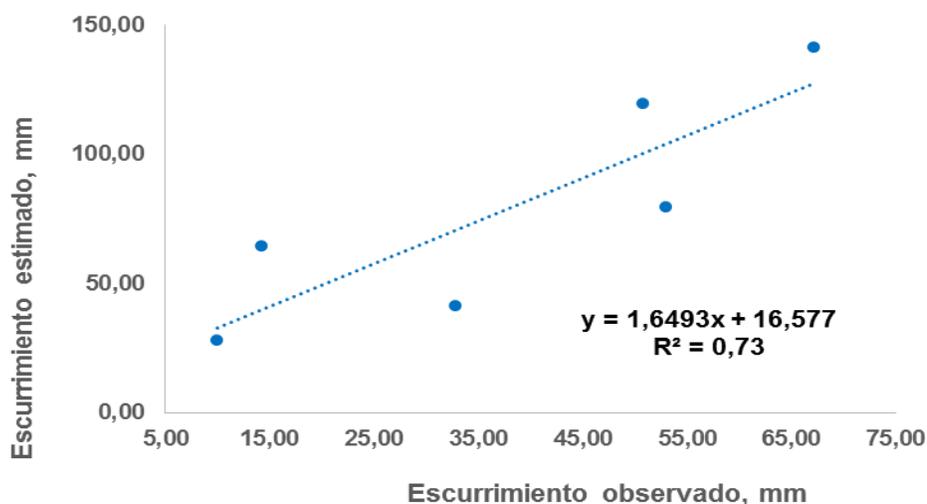
Según el modelo generado para el área bajo la cobertura del cultivo de caña de azúcar (figura 36) se tiene una relación de 1:3.8016, es decir, que por cada mililitro obtenido por medio de parcelas de escurrimiento el método de curva número supera este valor en 3.8016 mililitros, cuadruplicando la escorrentía observada. En el caso del modelo generado para el área bajo la cobertura de la plantación forestal (eucalipto) (figura 37), se tiene una relación de 1:1.6493, es decir, que por cada mililitro obtenido por medio de parcelas de

escurrimiento el método de curva número muestra 1.6493 mm, duplicando la escurrimiento observada.



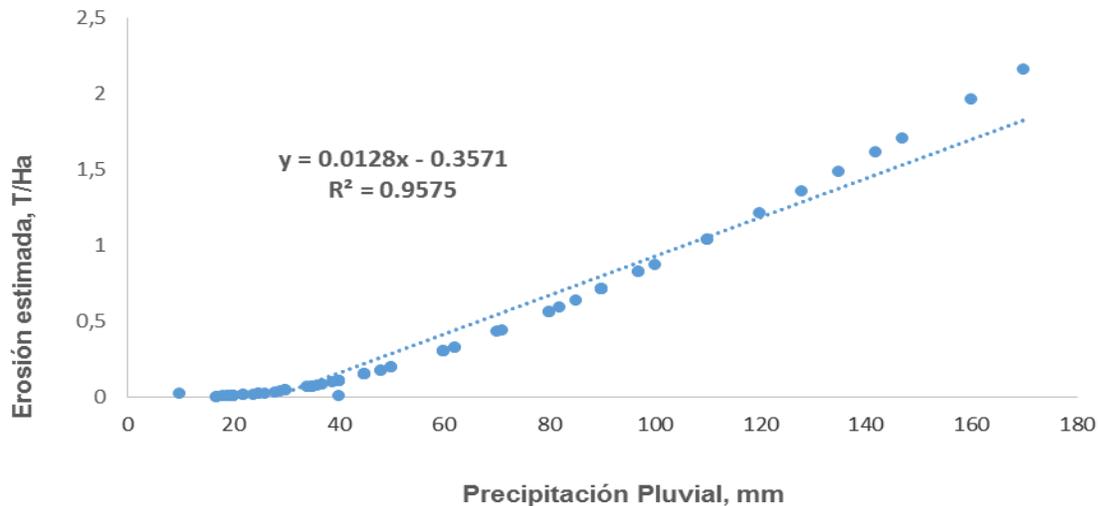
**Figura 36: Líneas de tendencia de regresión lineal para Escurrimiento directo Vrs Escurrimiento observado en el cultivo de caña de azúcar.**

La sobreestimación del escurrimiento bajo las diferentes coberturas vegetales se debe principalmente al tipo de crecimiento que muestran, ya que el cultivo de caña de azúcar presenta un crecimiento rápido con diferentes etapas fenológicas lo que hace variar la cobertura vegetal, mientras que la plantación forestal muestra crecimiento lento, por lo que no muestra diferencia con el crecimiento y variaciones de la cobertura vegetal.



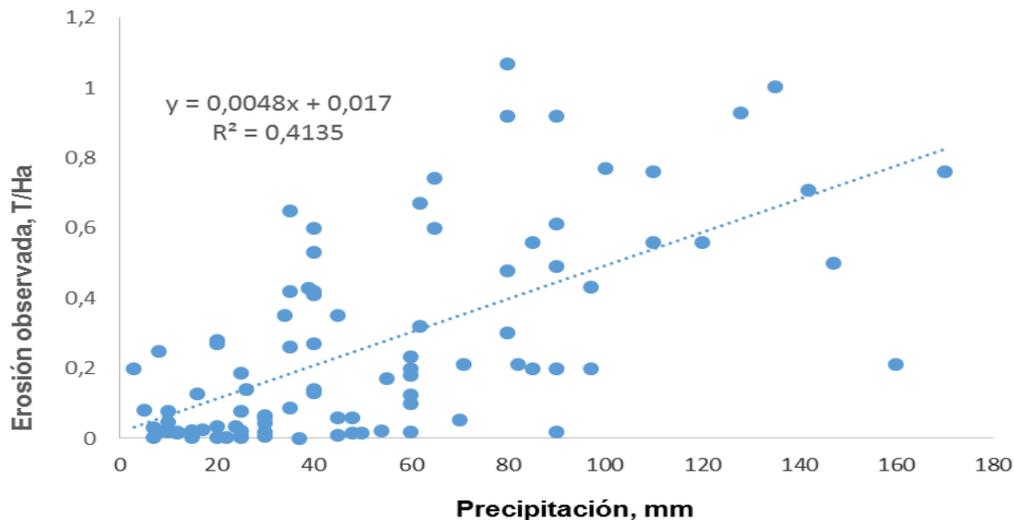
**Figura 37: Líneas de tendencia de regresión lineal para Escurrimiento directo Vrs Escurrimiento observado en el cultivo de la plantación forestal (eucalipto).**

Según el análisis de regresión lineal para las variables de precipitación y la erosión estimada por el método indirecto (MUSLE), se genera un modelo que se ajusta un 95.75% a los datos, es decir, que se podría sustituir la MUSLE por el modelo generado en la regresión lineal, ya que este solo demanda el factor precipitación (figura 38), facilitando así la estimación de la erosión hídrica, considerando las condiciones para las que se generó (parte alta de la zona cañera de Guatemala).



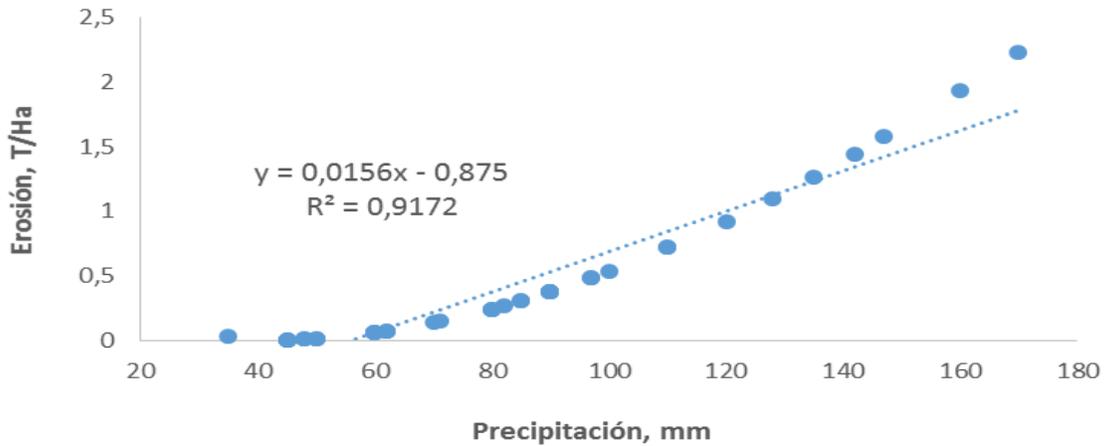
**Figura 38: Regresión lineal, erosión (método indirecto) Vrs. Precipitación. Caña de azúcar**

Sin embargo el análisis de regresión obtenido para las variables de precipitación y la erosión por el método directo (parcelas de escurrimiento), muestra que el modelo generado se ajusta en un 41% a los datos, por lo que dicho modelo tiene poca representatividad de la relación de la erosión y la precipitación, figura 39.



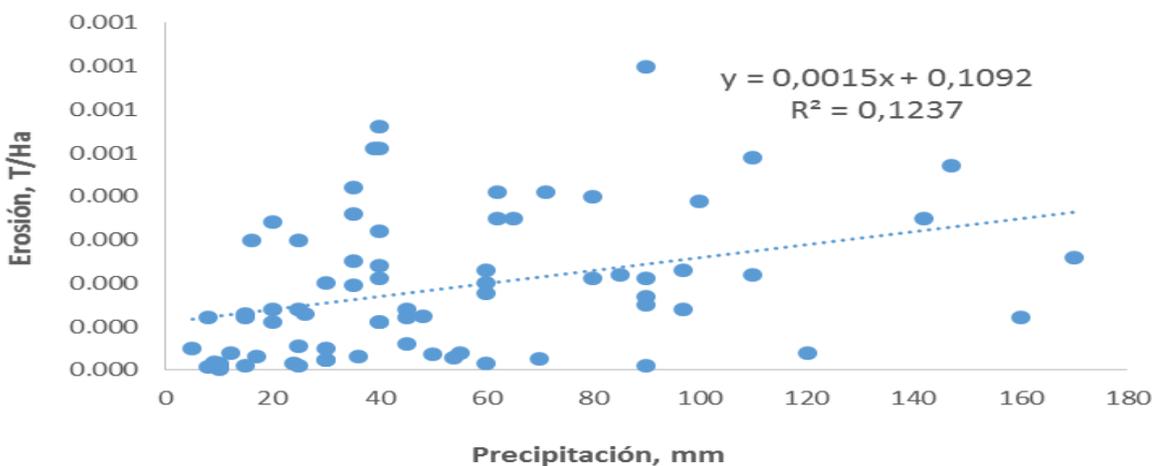
**Figura 39: Regresión lineal. Erosión (método directo) Vrs. Precipitación. Caña de azúcar**

Para el caso del área bajo la cobertura de la plantación forestal (eucalipto), los resultados del análisis de regresión lineal generado con datos de erosión estimados por MUSLE y datos de precipitación, generaron un modelo que se ajusta a dichos datos en un 91% (figura 40).



**Figura 40: Regresión lineal. Erosión (método indirecto) Vrs. Precipitación. Plantación forestal (eucalipto)**

Al igual que en el análisis de regresión para el cultivo de caña de azúcar el análisis de regresión obtenido para las variables de precipitación y la erosión obtenida a través del método directo (parcelas de escurrimiento), muestra un modelo que se ajusta en un 12% a los datos, figura 41.



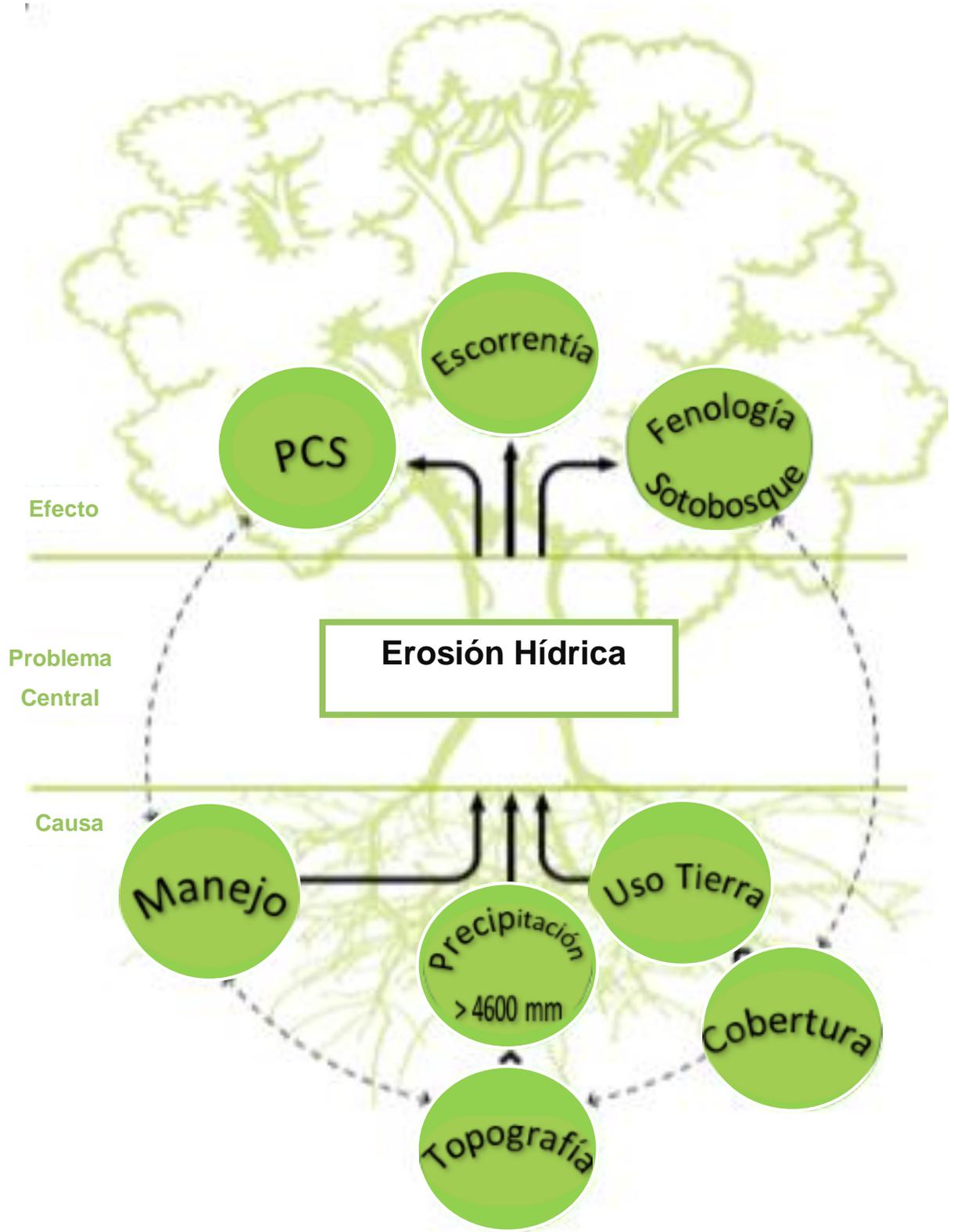
**Figura 41: Regresión lineal. Erosión (método directo) Vrs. Precipitación. Plantación forestal**

Según Morgan, 2005, la variable climática más importante es la lluvia, debido a su fuerte influencia en ciertos procesos de erosión hídrica (erosión de impacto, riles, cárcavas, etc.); sin embargo, no todas las tormentas son iguales, por lo que existen algunas más erosivas que otra, lo cual explica los resultados del análisis de regresión, ya que en el caso de MUSLE esta presenta una estrecha relación con la precipitación debido a que esta está involucrada en la mayoría de los cálculos efectuados para llegar a los resultados de erosión. Por otro lado la baja relación existente entre la precipitación y la erosión obtenida a través de las parcelas de escurrimiento, se debe principalmente a variables como la cantidad de agua caída (mm) e intensidad de la tormenta (mm/h), ya que por ejemplo en una tormenta cuya intensidad es relativamente baja, las tasas de infiltración no serán superadas, por lo que no se producirá escurrimiento superficial, soslayando el proceso de erosión laminar, además dicha tormenta no producirá erosión de impacto relevante, pues el tamaño de sus gotas no contará con suficiente energía cinética como para desprender las partículas de suelo (PHI-LAC 2010).

La duración de la tormenta, así como la distribución temporal de su intensidad, también son factores preponderantes en las tasas de erosión producidas. Una tormenta de larga duración provocará la contribución hídrica de toda la cuenca, aumentando los caudales en los cursos de agua y generando más escurrimiento superficial. Además, tormentas cuya intensidad máxima ocurre en su etapa final, cuando los suelos se encuentran ya saturados, también producirán una mayor cantidad de escurrimiento superficial. Esto sugiere que las condiciones iniciales de humedad en el suelo, es decir, el tiempo transcurrido desde la última tormenta, también es una variable influyente en las tasas de erosión hídrica para un suelo dado (PHI-LAC 2010).

### **2.6.3 Identificación de zonas vulnerables a la erosión hídrica**

Según resultados obtenidos durante la fase de campo y de gabinete del presente estudio, se realizó el árbol de problemas presentes en la microcuenca los Sujuyes, en el que se presentan las principales causas y efectos, considerando como problema principal la erosión hídrica (figura 42)



\*PCS = prácticas de conservación de suelos

Figura 42: Árbol de problemas, microcuenca Los Sujúyes

La microcuenca Los Sujuyes vista como un sistema productivo alberga tres subsistemas los cuales interactúan con los factores (causas) que intervienen en la erosión hídrica (problema principal) y responden de maneras distintas (efectos), las cuales se describen en el cuadro 30.

**Cuadro 30: Interacción de los principales factores que interviene en la erosión hídrica**

Sistema Productivo	Factor						Erosión (T/Ha)
	Uso de la tierra	Densidad de cobertura	Precipitación	Topografía	Manejo	PCS**	
<b>Caña de azúcar</b>	-	+	-	-	+	+	<b>25.38</b>
<b>Plantación forestal (eucalipto)</b>	+	-	-	-	-	+	<b>14.97</b>
<b>Sistema agroforestal (hule+maíz)</b>	-	-	-	-	-	NP	<b>15.25*</b>

- =directamente proporcional a la erosión; += inversamente proporcional a la erosión y NP =no presenta. += inversamente proporcional a la erosión, pero se desconoce el grado de su efecto.

\* datos observados de agosto a octubre, 2013. \*\* PCS= prácticas de conservación de suelo

En el sistema productivo de la caña de azúcar la densidad de siembra vista en cuanto a fenología del cultivo juego un papel importante en cuanto a la reducción del efecto de la precipitación y consecuentemente la cantidad de suelo erosionado. Esta relación se une mediante el manejo agronómico el cual contempla la fecha de siembra en la parte alta y según topografía (pendiente) para que el efecto de la lluvia sea manejado y controlado además por las prácticas de conservación de suelo establecidas en el área (curvas a nivel y acequias de ladera). Es decir que en este sistema el problema de erosión hídrica ya ha sido controlado por lo que no se hace necesario recomendar medidas para reducir la erosión hídrica, ya que al modificar las causas, los efectos son reducidos y favorecen a la

conservación del recurso suelo; pero se recomienda divulgar este modelo de sistema productivo a otros miembros del sector azucarero.

Si se compara el uso de la tierra se observa una diferencia de 10.4 T/Ha/año de suelo erosionado entre los sistemas productivos de caña de azúcar y la plantación forestal (eucalipto). Cuando se habla del efecto negativo de la densidad de cobertura en la plantación forestal se refiere a que la tasa de erosión de incrementa debido a la eliminación del sotobosque ocasionado por el manejo de malezas en plena época lluviosa lo cual contribuye a la erosión hídrica, por lo que se recomienda establecer nuevos parámetros sobre la época de control de malezas en la plantación forestal.

Como se indicó anteriormente la parcela de escurrimiento establecida bajo la cobertura de hule en asocio con maíz (sistema agroforestal) se encontraba fuera de los límites de la microcuenca Los Sujuyes por lo que su descripción se debe considerar para áreas con características similares, ya que en esta área los árboles de hule brindan poca protección al suelo, la cual contribuye a que la tasa de erosión se incremente, acunando a esta el efecto del manejo agronómico que se le brinda al cultivo de maíz. Por lo anterior se recomienda no practicar este tipo de asociación bajo altas pendientes o/y hacerlo con una densidad de siembra menor para el maíz y utilizar prácticas de conservación de suelos como la siembra a curvas a nivel.

## 2.7 CONCLUSIONES

1. Las tasas de erosión estimadas, para los diferentes usos de la microcuenca Los Sujuyes, a través de las parcelas de escurrimiento y la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (EUPSM o MUSLE) se encuentran, según la clasificación de la FAO, en un nivel de erosión moderada, esto sin considerar el efecto de las prácticas de conservación de suelos que se tiene en la microcuenca; siendo el área bajo la cobertura de caña de azúcar la que presenta la mayor tasa de erosión, seguida del área bajo la cobertura de hule y finalmente el área bajo la cobertura de eucalipto; sin embargo la modelación de la erosión hídrica con el sistema de información geográfica mostró que las prácticas de conservación disminuyen la erosión a un nivel leve o nulo.
2. Según características físicas de los suelos de la microcuenca Los Sujuyes, estos presentan un alto porcentaje de porosidad y una clase textural de tipo gruesa, las cuales les brindan una alta permeabilidad y consecuentemente una escorrentía superficial menor al 10% de la precipitación total.
3. La microcuenca Los Sujuyes vista como un sistema y separada en tres subsistemas de producción refleja en términos generales un manejo adecuado no solo del recurso suelo sino también de las variables que afectan la erosión hídrica, a saber, uso de la tierra, pendiente, cobertura (época de siembra y de corte) y prácticas de conservación de suelos; es por ello que no presenta áreas vulnerables a erosión hídrica que ameriten implementar otras prácticas de conservación de suelos, por lo que se considera como un modelo productivo que debe ser divulgado y replicado en otras áreas de la parte alta de la zona cañera guatemalteca.

## 2.8 RECOMENDACIONES

1. Calibrar los factores que se utilizan en la ecuación universal de pérdida de suelo modificada (MUSLE) tanto de cobertura, prácticas de conservación de suelo y el factor de escurrimiento ( $Q \cdot q_p$ ), que proporciona la fuente de energía de la lluvia a condiciones específicas para Guatemala.
2. Utilizar MUSLE para identificar áreas críticas y/o susceptibles al proceso de la erosión hídrica en otras áreas de interés.
3. Continuar con los monitoreo tanto de suelo erosionado como de escorrentía superficial en las parcelas de escurrimiento establecidas en la microcuenca Los Sujuyes.
4. Realizar un estudio de campo sobre erosión en cárcavas y el manejo de las mismas.
5. Comparar los datos de erosión hídrica obtenidos con las parcelas de escurrimiento de este estudio, con otros modelos o métodos indirectos destinados a estimar la erosión hídrica.
6. Establecer un manejo de malezas en zonas con altas pendiente y en suelos susceptibles a la erosión en función a proteger el recurso suelo.
7. Divulgar el modelo de producción de caña de azúcar en para que pueda ser replicado en toda la parte alta de la zona cañera guatemalteca.

## 2.9 BIBLIOGRAFIA

1. Almorox, AJ. 2010. La degradación de los suelos por erosión hídrica: métodos de estimación. Murcia, Universidad de Murcia. 384 p.
2. Arana López, GA. 1992. Análisis espacial para evaluar la erosión hídrica en la subcuenca del río Pensativo, Guatemala. Costa Rica, CATIE. 136 p.
3. Argota Quiroz, T. 2011. Simulación hidrológica de la cuenca del río Amajac, estado de Hidalgo aplicando el modelo Swat. México, Instituto Politécnico Nacional. 131 p.
4. Carrera Escobar, R. 2007. Apoyo técnico al proyecto de conservación de ecosistemas forestales estratégicos desarrollado en la subregión II -INAB-, Tactic, Alta Verapaz. Tesis Ing. Agr. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 129 p.
5. CENGICANÑA (Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar, GT). 1996. Estudio semidetallado de suelos de la zona cañera guatemalteca. (en línea). Guatemala. Consultado 13 abr 2013. Disponible en [http://www.cengicana.org/es/mapas-zona-canera/Mapas/Suelos/Estudios-de-Suelos/Estudio-Semidetallado-de-Suelos-\(VD002\)/](http://www.cengicana.org/es/mapas-zona-canera/Mapas/Suelos/Estudios-de-Suelos/Estudio-Semidetallado-de-Suelos-(VD002)/)
6. \_\_\_\_\_. 2012. El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala. Guatemala. 512 p.
7. Chamorro Batres, TM. 2007. Apoyo al programa de hidrología forestal del proyecto de conservación de ecosistemas forestales estratégicos desarrollado en la subregión II -INAB- , Tactic, Alta Verapaz. Tesis Inga. Agra. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 141 p.
8. CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical, Colombia); PASALAC (Programa para la Agricultura Sostenible en Ladera de América Central, AM); UNA (Universidad Nacional Agraria, Nicaragua). 2005. Manual de métodos sencillos para estimar erosión hídrica. Nicaragua, FARENA (Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente de la Universidad Nacional Agraria). 61 p.
9. Clérici, C; García Préchac, F. 2001. Aplicación del modelo USLE/RUSLE para estimar pérdidas de suelo por erosión en Uruguay y la región sur de la cuenca del río de La Plata. *Agrociencia* 5(1): 92-103. Uruguay. 103 p.
10. Díaz Herrero, A; Laín Huerta, L; Llorente, I. 2008. Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones: guía metodológica para su elaboración. España, Instituto Geológico y Minero de España. 190 p.
11. Domingo, J. 2010. El eucalipto y los suelos bajo clima mediterráneo. España, Universidad de Huelva. 30 p.

12. Dumas Salazar, Á. 2012. Riesgo de erosión hídrica en la cuenca hidrográfica del río Mundo. Tesis MSc. TIC. España, Universidad Complutense de Madrid. 48 p.
13. Escalante, S. 2005. La medición de sedimentos en México. Tabasco, México, IMTA-UJAT. 318 p.
14. FAO, IT. 1997a. Capacitación sobre el manejo y conservación de suelos. Nigeria, IITA. 225 p.
15. \_\_\_\_\_. 1997b. Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y la escorrentía. Roma, Italia, FAO. 161 p.
16. \_\_\_\_\_. 2000. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. Nigeria. 234 p.
17. \_\_\_\_\_. 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Roma, Italia, FAO. 83 p.
18. Foster, A. 1977. Métodos aprobados en conservación de suelos. 3 ed. México, Trillas. 411 p.
19. Franz, L. 2012. El blog de Franz (en línea). Ecuador. Consultado 12 de nov 2013. Disponible en <http://acolita.com/manual-uso-de-la-aplicacion-herramienta-modelbuilder-en-arccgis/>
20. Gaspari, F; Delgado, M; Denegri, G. 2009. Revista tierra latinoamericana: Estimación espacial, temporal y económica de la pérdida de suelo por erosión hídrica superficial. (en línea). México, Universidad Autónoma de Chapingo. Consultado 8 abr 2013. Disponible en <http://www.chapingo.mx/terra/articulos.php?id=MjcxMDQz>.
21. Guioteca, 2012. Erosión: el nuevo fantasma del cambio climático. (en línea). España. Consultado 3 ene 2012. Disponible <http://www.guioteca.com/medio-ambiente/erosion-el-nuevo-fantasma-del-cambio-climatico/>
22. Guzmán, I. 2012. Análisis técnico sobre los usos, tenencia y estado de las tierras para definir las modalidades de conservación: componente conservación. Perú, Sernanp. 35 p.
23. Herrera Ibáñez, Isaac. 2006. Geología de Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. 134 p.
24. Hudson, N. 1982. Conservación de suelos. España, Reverté. 352 p.

25. INAB (Instituto Nacional de Bosques, GT). 1999. Clasificación de tierras por capacidad de uso: aplicación de una metodología para tierras de la república de Guatemala. Guatemala. 96 p.
26. INETER (Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales, NI); COSUDE (Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación, NI). 2005. Erosión hídrica: mapas de amenazas, recomendaciones técnicas para su elaboración: proyecto MET-ALARN. Managua, Nicaragua. 52 p.
27. INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, AR). 2010. Agricultura sustentable 2010: actualización técnica. Argentina, INTA, Centro Regional Entre Ríos. 78 p.
28. Kirby, MJ; Morgan, RP. 1984. Erosión de suelos. México, Limusa. 375 p.
29. Latorre, LCA; Beguería, S. 2009. Los modelos de erosión: una revisión. Cuaternario y Geomorfología 23(1-2): 171-194. España.
30. Lianes, E; Marchamalo, M; Roldán, M. 2009. Evaluación del factor C de la RUSLE para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del río Birrís, Costa Rica. Costa Rica, CIA (Centro de investigaciones Agronómicas). 235 p.
31. MARN (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, GT). 2009. Informe ambiental del estado: GEO Guatemala. Guatemala, MARN. 286 p.
32. Medina, C. 2009. Modelos numéricos y teledetección en el lago de Izabal, Guatemala. Tesis PhD. España, UCA (Universidad de Cádiz). 294 p
33. Miliarium Aureum.com. 2003. Ingeniería civil y medio ambiente. (en línea). Madrid. Consultado 19 ene 2014. Disponible en <http://www.miliarium.com/prontuario/medioambiente/suelos/Rusle.htm>
34. Morgan, R. 1997. Erosión y conservación del suelo. Barcelona, España, Aedos. 342 p.
35. Núñez Solís, J. 2001. Manejo y conservación de suelos. San José, Costa Rica, EUNED. 267 p.
36. PHI-LAC (Programa Hidrológico Internacional de Unesco para América Latina y el Caribe, UY). 2010. Procesos de erosión-sedimentación en cauces y cuencas. Montevideo, Uruguay, UNESCO. 144 p.
37. Prieto Bolivar, CJ. 2004. El agua: sus formas, efectos, abastecimientos, usos, daños, control y conservación. Bogotá, Colombia, ECOE. 277 p.

38. PROCISUR (Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario Agroindustrial del Cono Sur, MV). 2001. Siembra directa en el Cono Sur. Montevideo, Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura. 450 p.
39. Rafaelli, S; López, FB; Almorox, AJ. 2010. La degradación de los suelos por erosión hídrica: métodos de estimación. España, Editum. 384 p.
40. Reyes García, LE. 2010. Diagnóstico general de los recursos naturales renovables, determinación de la erosión hídrica y servicios prestados en la aldea Ztamjuyu, Nahulá, Sololá. Tesis Ing. Agr. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 81 p.
41. Reyes Hernández, M. 2012. Algunas funciones de producción usadas en la asignación óptima de insumos y diagnóstico de cultivos: propiedades económicas y enfoques para su ajuste empírico. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 288 p.
42. Río, J. 2012. Cálculo de producción de sedimentos en la subcuenca del río Ahuehuepan, Taxco Guerrero. México, Universidad de Chapingo. 90 p.
43. Rivera Trejo, F; Gutiérrez López, A; Val Segura, R; Mejía Zermeño, R; Sánchez Ruiz, PA; Aparicio Mijares, J. 2005. La medición de sedimentos en México. México, IMTA. 318 p.
44. Román Ortiz, J. 2010. Ordenación agrohidrológica de la cuenca del río Beni Boufrah y restauración hidrológica forestal de La Rambla Kherbachihen, Alhucemas, Marruecos. Tesis Master. Madrid, España, Universidad Politécnica de Madrid. 400 p.
45. Romero, ER; Digozelli, PA; Scandaliaris, J. 2009. Manual del cañero. Las Talitas, Argentina, Estación Experimental Agroindustrial Obispo. 248 p.
46. Saguil Barrera, JL. 1995. Evaluación de tres prácticas de conservación de suelo y agua, en dos sistemas tradicionales de cultivo en asocio, en Buena Vista, Quesada, Jutiapa. Tesis Ing. Agr. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 57 p.
47. Salguero, M R. 2010. Ecuación universal de pérdida de suelo por erosión hídrica (USLE). Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 10 p.
48. Taboada, J. 2003. Dinámica de sedimentos en cuencas hidrográficas. Montecillos, México, Universidad de Chapingo. 117 p.
49. Unité Hydrographique Aquin, Saint Luis du Sud, FR. 2012. Rapport de l'étude ser l'érosiõb des sols MUSLE. Francia. 26 p.

50. Uribe, C. 2012. Estimación de la erosión hídrica y recomendaciones para la conservación de suelos en la reserva de la biósfera Barranca de Metzititlán. México. Universidad de Chapingo. 84 p.
51. Valverde, JC. 2007. Riego y drenaje. San José, Costa Rica, EUNED. 244 p.
52. Villalobos Araya, M. 2005. Diseño de drenaje superficial. Costa Rica, Universidad Tecnológica de Costa Rica. 92 p.
53. Villón Béjar, M. 2006. Drenaje. Costa Rica, Universidad Tecnológica de Costa Rica. 554 p.
54. WWF (World Wildlife Fund). 2001. Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on Earth. (en línea). Washington DC. Consultado el 30 abr 2013. Disponible en <http://www.worldwildlife.org/ecoregions/index>

**3 CAPÍTULO III. INFORME DE SERVICIOS PRESTADOS AL PROGRAMA DE MANEJO INTEGRADO DE CUENCAS DEL INSTITUTO PRIVADO DE INVESTIGACIÓN SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO, SANTA LUCÍA COTZUMALGUAPA, ESCUINTLA, GUATEMALA, C.A.**

### **3.1 SERVICIO 1: EVALUACIÓN DE CINCO TRATAMIENTOS GERMINATIVOS PARA SEMILLAS BOTÁNICAS DE MANGLE BOTONCILLO (*CONOCARPUS ERECTUS*), PROVENIENTES DE TAHUEXCO SUCHITEPÉQUEZ.**

#### **3.1.1 Introducción**

El mangle es un árbol característico de humedales costeros de zonas tropicales. Estos ecosistemas pasan gran parte del año inundados por agua salina, ya que están asociados a las mareas. El manglar es un bosque que mantiene las hojas todo el año, denso, compuesto por un pequeño grupo de especies de árboles (mangles), que marcan la transición entre el mar y la tierra (Moreno Casasola e Infante Mate 2009). El mangle Botón (*Conocarpus erectus*), es un árbol que corrientemente tiene forma de arbusto, generalmente habita en el lado hacia tierra de los manglares y se distingue como la única especie de mangle con hojas alternas (DRNA 2009). Algunos autores no lo consideran un verdadero manglar, aunque siempre está asociado a las otras especies o bien bajo la influencia de las mareas, como sucede en las playas (Moreno Casasola e Infante Mate 2009).

El mangle botón es el hábitat de varias especies. Como un componente integral de la mayoría de los conjuntos de manglares, *C. erectus* ayuda a amortiguar el borde superior de los hábitats de manglares (Ellison, Farnsworth, & Moore 2010), debido a que es la última especie en la sucesión de manglares, desde la costa hasta tierra adentro.

Lo anterior es importante, ya que la zona de manglares está disminuyendo a nivel mundial debido a una serie de amenazas localizadas. La amenaza principal es la destrucción del hábitat y la eliminación de las zonas de manglares. Razones para la eliminación incluyen la autorización para las granjas de camarón, la agricultura, estanques de peces, la producción de arroz y salinas, y para el desarrollo de las zonas urbanas e industriales, construcción de carreteras, plantaciones de coco, puertos, aeropuertos y centros turísticos. Otras amenazas incluyen la contaminación de las aguas residuales, los desechos sólidos, la sedimentación, el aceite y la escorrentía agrícola y urbana. El cambio climático también se piensa pueda ser una amenaza, sobre todo en los bordes (Ellison, Farnsworth y Moore 2010); es por ello que el Instituto Privado de Investigación sobre

Cambio Climático –ICC- tiene el interés de conocer los factores que determinan que *C. erectus* tenga un porcentaje de germinación menor del 12% de acuerdo a Tovilla Hernández y Lanza Espino 1999. Se conoce que esta especie produce una alta cantidad de semillas, pero muchas de ellas son abortados o no germinan (Ellison, Farnsworth y Moore 2010).

Para ello se realizó la evaluación de 5 tratamientos germinativos, siendo estos los siguientes: a) lavado de semillas durante 7 días, b) lavado de semillas durante 15 días, c) aplicación de ácido giberélico, d) aplicación de nitrato de potasio y e) un testigo. Los tres primeros tratamientos se basan en los efectos de 2 hormonas, las cuales son el ácido abscísico (ABA) y el ácido giberélico (GA), dado que se ha observado que el ABA controla el crecimiento y la maduración del embrión y previene la germinación (Herrera, Alizaga, Guevara y Jiménez 2006). Por otro lado el embrión libera giberelinas (GA), después de que la semilla embebe, para inducir la germinación de la semilla.

### **3.1.2 Marco teórico**

#### **A. Manglares**

El término “Mangle” deriva de un vocablo guaraní que significa árbol torcido. Los manglares corresponden a la vegetación arbórea de la zona de mareas que corresponde al ecotono entre los ambientes marino y terrestre. Los manglares pueden crecer a diferentes salinidades que van desde 0 ups (dulceacuícolas) hasta hipersalinas (más de 40 y hasta 90 ups), alcanzando su máximo desarrollo en condiciones salobres (aproximadamente a 15 ups; las unidades ups equivalen a gramos de sal por litro de agua). De estas halófitas se conocen 69 especies núcleo (3 especies de helechos, una de palma y 65 de arbustos o árboles) correspondientes a 24 géneros distribuidos en 19 familias (Agraz Hernández, Noriega Trejo, López Portillo, Flores Verdugo y Jiménez Zacarías 2006). Conforme aumenta la salinidad, la altura de los árboles disminuye, siguiendo el marcado gradiente que se presenta entre las orillas de los canales y tierra adentro (Vásquez Rodríguez 2007). Las especies de manglar poseen adaptaciones morfológicas y fisiológicas que les permiten ocupar hábitats bajo condiciones especiales, tales como suelos desde limosos hasta arenosos, inestables y con baja concentración de

oxígeno, en ambientes salinos y salobres. Así mismo, estas especies han desarrollado estrategias reproductivas como la viviparidad o criptoviviparidad (frutos que germinan en la planta madre y que forman propángulos e hipocotilos), un sistema de raíces verticales conocidos como pneumatóforos que captura oxígeno atmosférico y de raíces de cable y de anclado que penetran hasta 60 cm y que da estabilidad y soporte al tronco. Tienen además glándulas en las hojas que les permiten secretar el exceso de sal y hojas gruesas, similares a las plantas de desierto, pero de mayor tamaño (Agraz Hernández, Noriega Trejo, López Portillo, Flores Verdugo y Jiménez Zacarías 2006)

### **B. Los manglares y su ambiente**

Según Ehittaker y Linkens, 1975, citado por Agraz Hernández, Noriega Trejo, López Portillo, Flores Verdugo, & Jiménez Zacarías, 2006, las lagunas costeras, estuarios, marismas, arrecifes de coral, pastos marinos, macroalgas y manglares, están ampliamente reconocidos como los ecosistemas más productivos de la Biosfera.

La alta productividad primaria de estos ecosistemas se debe principalmente a la disponibilidad de nutrientes provenientes de los ríos y escurrimientos terrestres y al efectivo reciclamiento de éstos durante su mineralización microbiana (Nixon 1981).

Los manglares y los complejos lagunares-estuarinos, a diferencia de los bosques templados y selvas tropicales, son ecosistemas abiertos, porque para su funcionamiento requieren del aporte de agua dulce por ríos, arroyos, y mantos freáticos, así como del aporte de agua marina. Las actividades en la cuenca hidrológica, en la franja litoral y en zona marina adyacente, son factores importantes de influencia en los procesos funcionales de los manglares y lagunas costeras estuarinas. Los ríos, los ecosistemas lagunares-estuarinos, como los manglares y las zonas marinas adyacentes, están funcionalmente vinculados a través de las mareas y bocas (Agraz Hernández 2001). Es importante destacar que el 90% de la pesca mundial, se efectúa en la región costera y que el 70% de esta pesca, lo constituyen organismos estuarinos o marinos, que dependen del ecosistema lagunar-estuarino en algún periodo de su vida.

A pesar de la variabilidad de este ambiente, los manglares han tenido éxito en su colonización debido a numerosas adaptaciones morfológicas, fisiológicas y reproductivas. Dentro de las adaptaciones fisiológicas, la que controla la concentración de salinidad es quizás la más importante para su éxito colonizador (Vásquez Rodríguez 2007). Se han desarrollado tres formas de regular la salinidad, que no son excluyentes entre sí como:

- a. Exclusión: consiste en regular la entrada de sal por medio de un diferencial permeable de las membranas de las raíces.
- b. Extrucción: secretan sal por medio de glándulas que expulsan los cristales de sodio y cloro.
- c. Acumulación: deposición de cierta cantidad de sal en tejidos de los tallos, de las hojas, raíces y en las hojas viejas.

### **C. Los manglares y el patrón hidrológico**

Una de las características más importantes de los elementos arbóreos del manglar, es su adaptación a condiciones específicas de periodicidad de inundación y exposición al aire, diferente para cada especie. Esto determina la distribución y zonación de los manglares, e incluso influye en la sucesión. Estas condiciones resultan de las situaciones hidrológicas netas de la zona en particular y son producto de la combinación de las mareas, aportes fluviales, escurrimientos terrestres, precipitación-evaporación, viento, profundidad y geomorfología del cuerpo de agua adyacente, tasa de sedimentación (y hundimiento o subsidencia) y la extensión de su nivel topográfico óptimo. Todos estos son los factores de gran importancia que determinan el éxito de los programas de reforestación o forestación con mangle.

### **D. Usos, servicios, valore económico y ecológico**

Los bosques de manglar se encuentran relacionados funcionalmente con los ecosistemas lagunares estuarinos, proporcionando múltiples servicios, usos y funciones de valor para la sociedad, para la flora y la fauna silvestre, y para el mantenimiento de sistemas y procesos naturales. Estos ecosistemas sirven como sistemas naturales de control y barrera contra inundaciones e intrusión salina, control de la erosión y protección a la costa y filtro biológico (por remoción de nutrientes y toxinas). Son además el hábitat de especies de

peces, crustáceos y moluscos de importancia ecológica y comercial. Constituyen zonas de refugio y alimentación de fauna silvestre amenazada y en peligro de extinción, y de especies endémicas y migratorias.

Son fuentes de energía (leña o turba), proporcionan materias para tinción de telas y curtido de pieles, así como desinfectantes y astringentes. Históricamente, los manglares se han utilizado como fuente de energía y materias primas (carbón, material de construcción, extracción de sal, taninos y otros tintes e incluso alimento). Como ejemplo están los usos tradicionales en la Península de Yucatán: la corteza del mangle rojo (*Rhizophora mangle*) se usa para curar elefantiasis, lepra, diarrea y disentería; la infusión de hojas del mangle rojo se usa para curar el escorbuto, como enjuague bucal para el dolor de muelas y en aplicación local para tratar la úlcera leprosa. La infusión de hojas del mangle botoncillo (*Conocarpus erectus*), se receta para curar el asma, el estado bilioso, el dolor de cabeza, evacuaciones amarillas, y la infusión de sus raíces se usa para tratar testículos inflamados y reumatismo.

Las áreas de manglares pueden también considerarse como vías de comunicación y como un banco genético y tienen un alto valor estético y recreativo, además de cultural y educativo. Mantienen procesos de acreción, sedimentación y formación de turba; son excelentes sistemas de absorción de bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), mitigando el efecto del calentamiento global asociado al cambio climático por sus elevadas tasas fotosintéticas y son una importante fuente de materia orgánica (detritus). Los manglares y las marismas son también la zona de amortiguamiento de inundaciones, una función crucial en las zonas con alta frecuencia de huracanes y tormentas.

En diversos países del Caribe, el turismo asociado a los humedales es la principal fuente de ingresos y se calcula que el valor económico y ecológico de los manglares, en beneficios directos e indirectos, está entre 10,000 y 125,000 dólares por hectárea (Agraz Hernández 2005).

## E. Descripción de especies

- 1. *Avecenia germinans* (Mangle negro o madre Sal):** pertenece a la familia Verbenaceae, posee los siguientes nombres comunes: apompó, madre sal, mangle, mangle negro, mangle prieto, maya.

Esta especie florece en los meses más lluviosos. Las hojas son simples, opuestas, lámina foliar oblonga a lanceolado-elíptica, más o menos coriácea, ápice obtuso, base cuneada, los nervios por lo general evidentes, glándulas excretoras en el envés de la hoja. Forma inflorescencias en forma de panículas cortas en las puntas de las ramas, las flores verdosas, crema o blanquecinas, la corola de consistencia seríceas. El fruto es una cápsula verde pálida, comprimida lateralmente hasta 4 cm de longitud en su madurez.

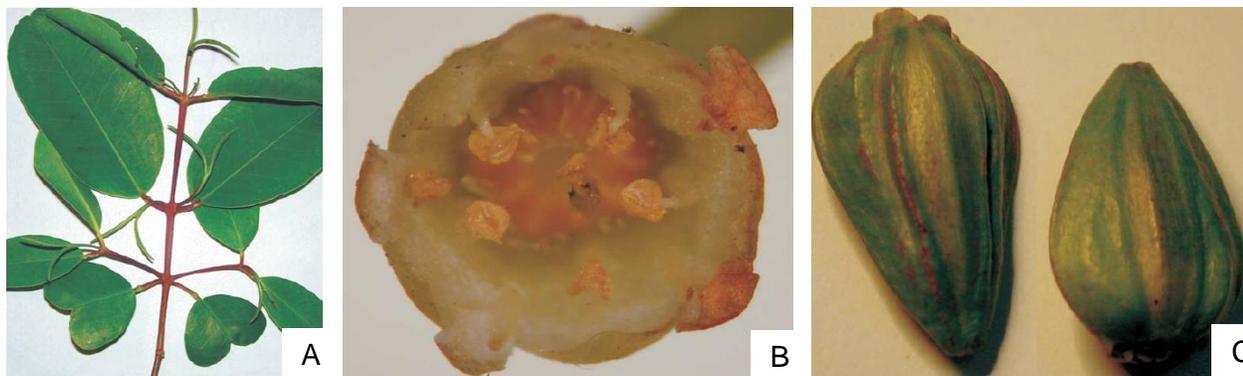


**Figura 43: *Avecenia germinans*. A) Corteza fisurada en placas, B) Flor y C) Fruto. Fuente: Agraz Hernández, Noriega Trejo, López Portillo, Flores Verdugo y Jiménez Zacarías (2006) v Toptropicals (2013).**

- 2. *Laguncularia racemosa* (mangle blanco):** pertenece a la familia Combretaceae, posee los siguientes nombres comunes: mangle blanco, mangle bobo, manche chino.

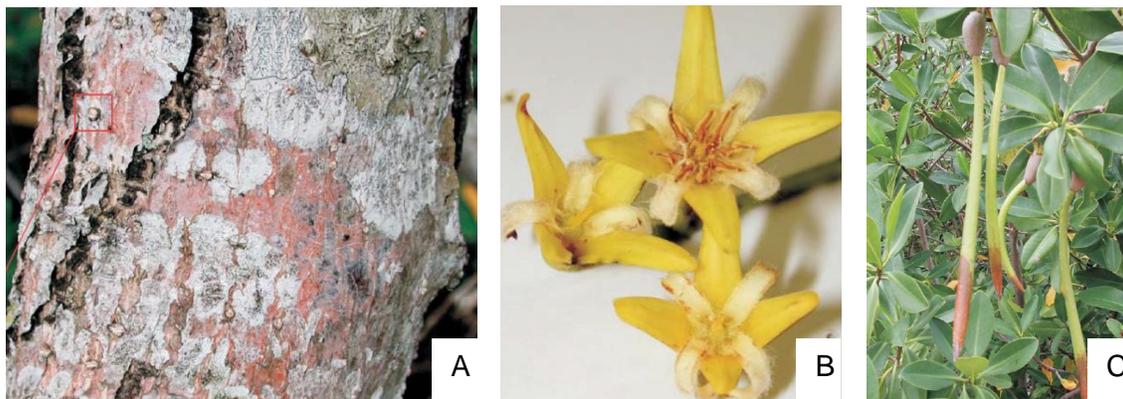
Florece en los meses más lluviosos. Árboles dioicos o hermafroditas; el tronco poco o abundantemente ramificado, corteza fisurada, rugosa, grisácea-café. Tallos y peciolos se tornan rojizos y ramas teretes. Lámina foliar elíptica oblonga de 5 a 8 cm de largo y de 3 a 5 cm de ancho, ápice redondeado o a veces algo emarginado,

base truncada, glabra a ligeramente redondeado, con un par de glándulas en la parte superior. Inflorescencias espigadas, arregladas en panículas terminales. Flores blanco verdosas. Los frutos dos nuececillas.



**Figura 44: *Laguncularia racemosa*. A) Peciolos rojizos, B) Flor blanco-verdosas y C) Fruto dos nuececillas. Fuente: Agraz Hernández, Noriega Trejo, López Portillo, Flores Verdugo y Jiménez Zacarías (2006)**

3. ***Rhizophora mangle* (mangle rojo o colorado):** pertenece a la familia Rhizophoraceae, posee los siguientes nombres comunes: candelón, mangle colorado, mangle dulce, mangle rojo, mangle tinto.

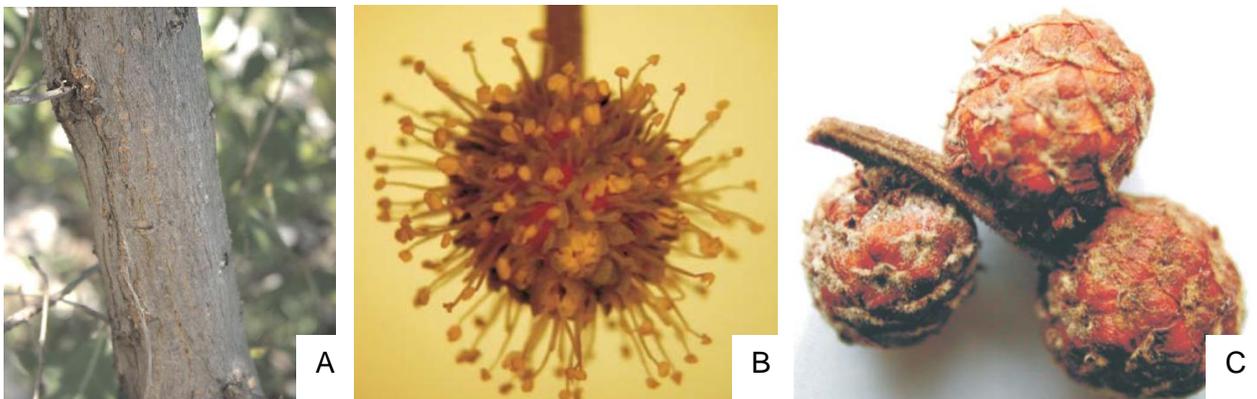


**Figura 45: *Rhizophora mangle*. A) Tronco con numerosas lenticelas, B) Inflorescencias simples amarillas verdosas y C) Fruto una baya piriforme dura. Fuente: Agraz Hernández, Noriega Trejo, López Portillo, Flores Verdugo, & Jiménez Zacarías, 2006**

Árboles con el tronco y las ramas apoyadas en numerosas raíces zancudas, simples o dicotómicamente ramificadas. Con numerosas lenticelas, la corteza lisa, grisácea, rojiza pardo. Hojas simples, decusadas, lámina foliar elíptica a oblonga de 8 a 13 dm de largo y de 4 a 5.5 cm de ancho, ápice agudo. Inflorescencias simples con dos o tres flores seríceas, amarillo verdosas. Fruto una baya piriforme, dura, pardo rojiza, con el embrión germinado dentro del fruto aún unido a la planta, que luego se desprende una vez que el hipocótilo alcanza de 15 a 40 cm de largo.

**4. *Conocarpus erectus* (mangle botoncillo):** pertenece a la familia Combretaceae, posee los siguientes nombres comunes: botoncahui, botoncillo, laurelillo, mangle cenizo, tabché (maya).

Florece en los meses más lluviosos. Los árboles son dioicos; la corteza fisurada y rugosa. Hojas simples, alternas o en ocasiones congestionadas en las puntas de las ramas, la lámina foliar ovado-lanceolada de 4 a 9 cm de largo y de 2 a 3 cm de ancho, base cuneada, con un par de glándulas en el envés formadas por la nervadura media las nervaduras secundarias. Las flores en inflorescencias en forma de panículas terminales integradas por cabezuelas globosas. Infructescencias pequeñas y globulares (en el interior unas nuececillas comprimidas en la madurez).



**Figura 46: *Conocarpus erectus*. A) Corteza fisurada y rugosa, B) Flores diminutas y C) Infrutescencias pequeñas y globulares. Fuente: Agraz Hernández, Noriega Trejo, López Portillo, Flores Verdugo, & Jiménez Zacarías, 2006**

## **F. Bosque de mangle**

Los manglares son sistemas altamente productivos bajo las condiciones ecológicas que los sustentan, en particular la demanda ecológica de agua del sistema. Los manglares proveen mayor beneficio por los servicios ambientales que brindan, comparados con los bienes de uso directo que se obtiene de ellos (Guatemala forestal 2010).

Los manglares son considerados como uno de los ecosistemas más productivos del planeta por su aporte ecológico y rendimiento económico, sus raíces sumergidas funcionan como criaderos para muchas especies de peces, crustáceos y moluscos, contribuyendo desde la perspectiva de la seguridad alimentaria, al ser una fuente de subsistencia de las poblaciones humanas ubicadas a lo largo de los litorales costeros. De estos ecosistemas dependen hasta dos terceras partes de las especies de peces que habitan los mares, los cuales son vitales para la industria de la pesca. Los manglares proveen hábitat y refugio a una gran diversidad de mamíferos e invertebrados, y constituyen un área para la procreación de un número considerable de especies de aves, tanto residentes como migratorias, muchas de ellas vulnerables o en peligro de extinción.

A este ecosistema llega estacionalmente una amplia diversidad de fauna terrestre y acuática. Además de proteger las costas marinas contra la erosión y las marejadas ocasionadas por los huracanes, los manglares tienen una alta capacidad para atrapar sedimento y hojarasca entre sus raíces, con lo que contribuyen a la recuperación de suelos por su alta productividad de materia orgánica. Últimamente, han sido incluidos en la agenda de los operadores de turismo local de aventura y turismo de pesca. (MARN 2013).

### **3.1.3 Bosque de mangle en Guatemala**

Según el MARN (2013), el área total de mangle en la República de Guatemala es de 18,840.08 hectáreas. Como se puede ver en el cuadro 31, el área de mangle en la Costa Pacífica es mucho mayor que en el Caribe, suponiéndose que puede deberse a que la salinidad de la primera es más alta.

**Cuadro 31: área cubierta por mangle**

Costa	Área (Ha)
Pacífico	17,670
Caribe	1,169.52

Fuente: MARN, 2013

En Guatemala se registran 4 tipos de mangle, las cuales son: el mangle rojo, *Rizophora mangle* y *Rizophora rrisonii*, mangle negro o ixtatén, *Avicenia germinans*, mangle blanco, *Laguncularia racemosa*; y el botoncillo, *Conocarpus erectus*. Estas especies crecen sobre sustratos lodosos protegidos de las corrientes y las olas. Aunque existe una zonificación del manglar, usualmente crecen en rodales mixtos con más de una especie (Guatemalaforestal 2010). Según el MARN (2013), se tiene la siguiente extensión de cada especie de mangle:

**Cuadro 32: área cubierta según tipo de mangle.**

Tipo de mangle	Área (Ha)
Mangle Blanco ( <i>Laguncularia racemosa</i> )	6,206.07
Mangle Botoncillo ( <i>Conocarpus erectus</i> )	60.57
Mangle Negro o madre sal ( <i>Avicenia germinans</i> )	585.03
Mangle colorado o rojo ( <i>Rhizophora mangle</i> )	11,988.41

Fuente: MARN, 2013

Del área actual de mangle en el país, el 27% se encuentra protegido a través del sistema Guatemalteco de Áreas Protegidas (SIGAP). En el Pacífico, el 22.76% (4,020.94 ha) de la cobertura de mangle, se encuentra bajo algún régimen de conservación dentro del SIGAP, mientras que en el Caribe corresponde al 88% (1,031.50 ha).

### **3.1.4 Objetivos**

#### **A. Objetivo General**

Evaluar 5 tratamientos germinativos para semillas botánicas forestales de *Conocarpus erectus* L. provenientes de Tahuexco, Suchitepéquez

#### **B. Objetivos Específicos**

- Determinar la calidad de las semillas botánicas de *C. erectus* mediante pruebas de germinación
- Determinar los factores limitantes en la germinación de semillas botánicas de *C. erectus*

### **3.1.5 Metodología**

#### **A. Pruebas de germinación**

##### **Prueba de viabilidad**

Para esta prueba se utilizaron dos repeticiones de 100 semillas cada una, para cada especie, esto según las Normas para Bancos de Genes (FAO/IPGRI, 1994).

##### **Método de germinación sobre papel**

Se utilizó papel mayordomo (sin estampado u aroma) como papel absorbente húmedo, en bandejas las cuales se les ajustó una tapadera de nylon transparente para evitar la pérdida de la humedad.

- 1°. El papel absorbente se cortó de acuerdo con el tamaño y la forma del recipiente, luego se colocó en el fondo del recipiente.
- 2°. Los recipientes se rotularon con el número de repetición, con la ayuda de un lápiz para evitar que se borrara el etiquetado.
- 3°. Se utilizó agua del chorro para humedecer el papel. Luego se colocaron las semillas ordenadas en tresbolillo. La distancia entre semillas fue de por lo menos tres a cinco veces el diámetro de la semilla. Luego se cubrieron las semillas con otra hoja de papel toalla humedecida. Se ajustó la tapadera de nylon a los recipientes.
- 4°. Los recipientes con las semillas fueron colocadas en unos estantes a temperatura ambiente debido a que no se cuenta con una incubadora que regule la temperatura recomendada (25 a 30 °C).
- 5°. El conteo de semillas germinadas se inició a partir del tercer día de haber establecido las pruebas y también se revisó diariamente el nivel de humedad del sustrato.

#### **B. Estimulación de la germinación de semillas botánicas de *C. erectus***

##### **Hipótesis**

Al menos uno de los tratamientos a evaluar ofrecerá un incremento en el porcentaje de germinación para las semillas botánicas de Mangle botoncillo (*Conocarpus erectus*)

## Material experimental

Las semillas utilizadas fueron colectadas en Tahuexco, Suchitepéquez, por el ingeniero Cesar Zacarías, encargado de Mangle (INAB), de la región IX, Costa Sur en el año 2012. Los frutos presentaban una madurez fisiológica adecuada y no presentaban deterioro exterior.

## Descripción de los tratamientos

**T1 Testigo:** Para este tratamiento se contó con un total de 300 semillas las cuales no fueron sometidas a tratamiento previo alguno.

**T2 y T3 Lavado de semillas por 7 y 15 días:** 600 semillas fueron colocadas en pequeñas bolsas de 10 cm de largo elaborada con tela de medias, divididas en dos grupos (300 semillas cada uno). El primer grupo correspondiente al tratamiento T3: lavado por 15 días se introdujeron durante quince días en una botella de capacidad de 600 ml, una semana después el otro grupo correspondiente al tratamiento T2: lavado por 7 días fue puesto también en el sistema de lavado de semillas.

El sistema de lavado de semillas (figura 47) estaba constituido de una toma de agua potable constante (A), un tanque agua (tonel con capacidad de 54 galones (B)), tubería PVC de ½ pulgada (C) y botellas de 600 ml (D), dispuestas de tal forma que el agua que se encontraba en las botellas fuera sustituida eventualmente en el día por agua proveniente del tanque de agua, a través de unos orificios de 1.5 mm que las botellas tenían en sus paredes.

**T4 Ácido Giberélico (GA<sub>3</sub>):** Utilizando 300 semillas se colocaron en el papel de la prueba de germinación; el cual fue humedecido con una solución al 0.05% de ácido giberélico (GA<sub>3</sub>), se preparó disolviendo 500 mg de GA<sub>3</sub> en 1 litro de agua. Luego se continuó la germinación en las condiciones recomendadas.

**T5 Nitrato de Potasio:** Utilizando 300 semillas se colocaron en el papel de la prueba de germinación; el cual fue humedecido con una solución al 0.2% de nitrato de potasio ( $\text{KNO}_3$ ) que se preparó disolviendo 2 g de  $\text{KNO}_3$  en 1 litro de agua para humedecer el papel de la germinación al comienzo de la prueba.



Figura 47: sistema de lavado de semillas

### Diseño experimental

El experimento se realizó en los invernaderos del Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar –CENGICAÑA–, ubicado en el municipio de Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla. Se utilizaron bandejas de 30 cm de ancho, 45 cm de largo y 15 cm de profundidad, a las que se les adaptó una tapadera de nylon para evitar la pérdida de humedad. Cada unidad experimental estuvo conformada por una bandeja, la cual contenía 100 semillas de la especie. Por cada tratamiento se utilizó 3 bandejas, por lo que en total se utilizaron 15 bandejas, las cuales se dispusieron en un diseño experimental de Completamente al Azar, el cual contó con 5 tratamientos y 3 repeticiones.

La distribución espacial de los tratamientos dentro de los invernaderos se realizó de forma aleatoria (figura 48), es decir, sin ninguna restricción, utilizando una calculadora científica y la función random.



**Figura 48: Distribución espacial de los tratamientos**

### Modelo estadístico

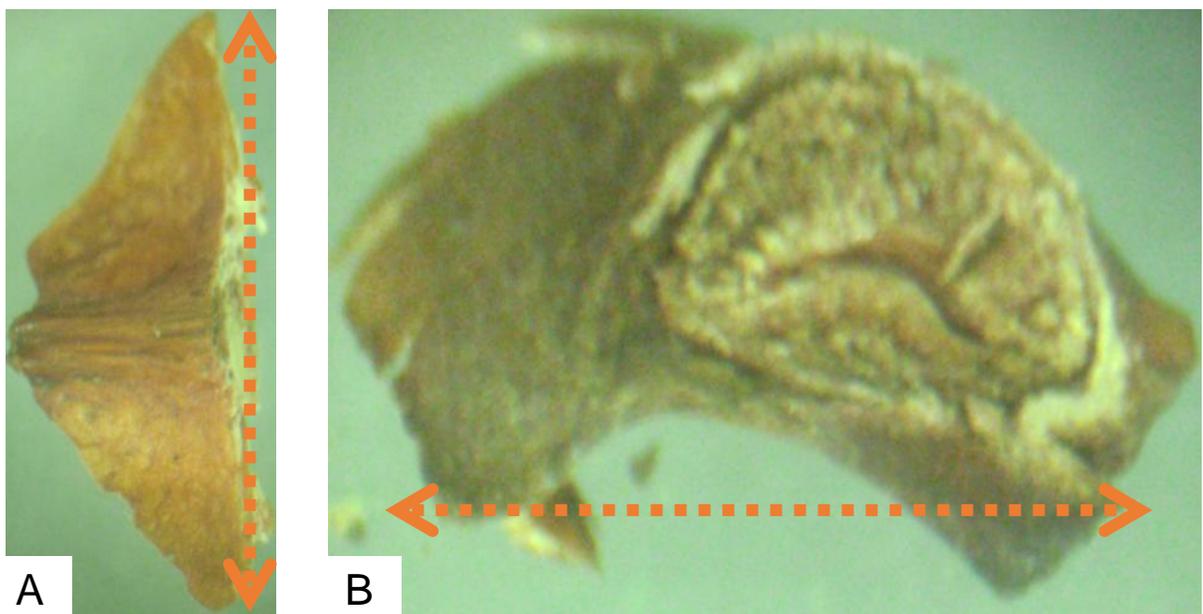
$$Y_{ij} = \mu + t_i + \varepsilon_{ij}$$

Lo cual significa que la variable respuesta, en este caso porcentaje de germinación, ( $Y_{ij}$ ) depende de la media general ( $\mu$ ), del efecto del  $i$ -ésimo tratamiento ( $t_i$ ) y del error experimental asociado a la  $ij$ -ésima unidad experimental ( $\varepsilon_{ij}$ ) –bodega con 100 semillas-. La variable respuesta fue el porcentaje de germinación.

### C. Factores limitantes en la germinación

Esta fase se realizó en los laboratorios de CENGICAÑA, del área de fitopatología. Se coordinó para tener acceso a los materiales y equipo para hacer cortes de frutos y semillas de *C. erectus* y así conocer parte de la anatomía y morfología de la semilla. Para esto se procedió de la siguiente manera:

- 1º. Se inició a realizar cortes de semillas las cuales estaban embebidas (se colocaron las semillas en un recipiente con agua de chorro por una semana) pero la disección se dificultó por el material esponjoso que constituye la semilla, por lo que se utilizaron semillas normales o secas.
- 2º. Con la ayuda de un microscopio estereoscópico se realizaron cortes transversales (fotografía 49A) en la base del fruto, y cortes longitudinales (fotografía 49B) en la parte media del fruto.



**Figura 49: Corte en semillas de *C. erectus*. A) Corte transversal en la base del fruto y B) corte longitudinal en la parte media del fruto.**

- 3º. Se realizó el conteo de frutos que presentaron presencia de semilla normal así como frutos que no presentaron presencia de semilla.

### 3.1.6 Resultados

#### A. Determinación de la calidad de la semilla

La primera prueba de germinación se realizó en el mes de abril (época seca). Para esta se realizaron dos repeticiones de 100 semillas cada una, utilizando un total de 200 semillas de *C. erectus* según las reglas Internacionales para el Ensayo de Semillas (ISTA 1976). En esta primera prueba las semillas no se sometieron a ningún tratamiento pregerminativo y al cabo de 15 días se obtuvo un 10% de germinación (Figura 50, curva roja).

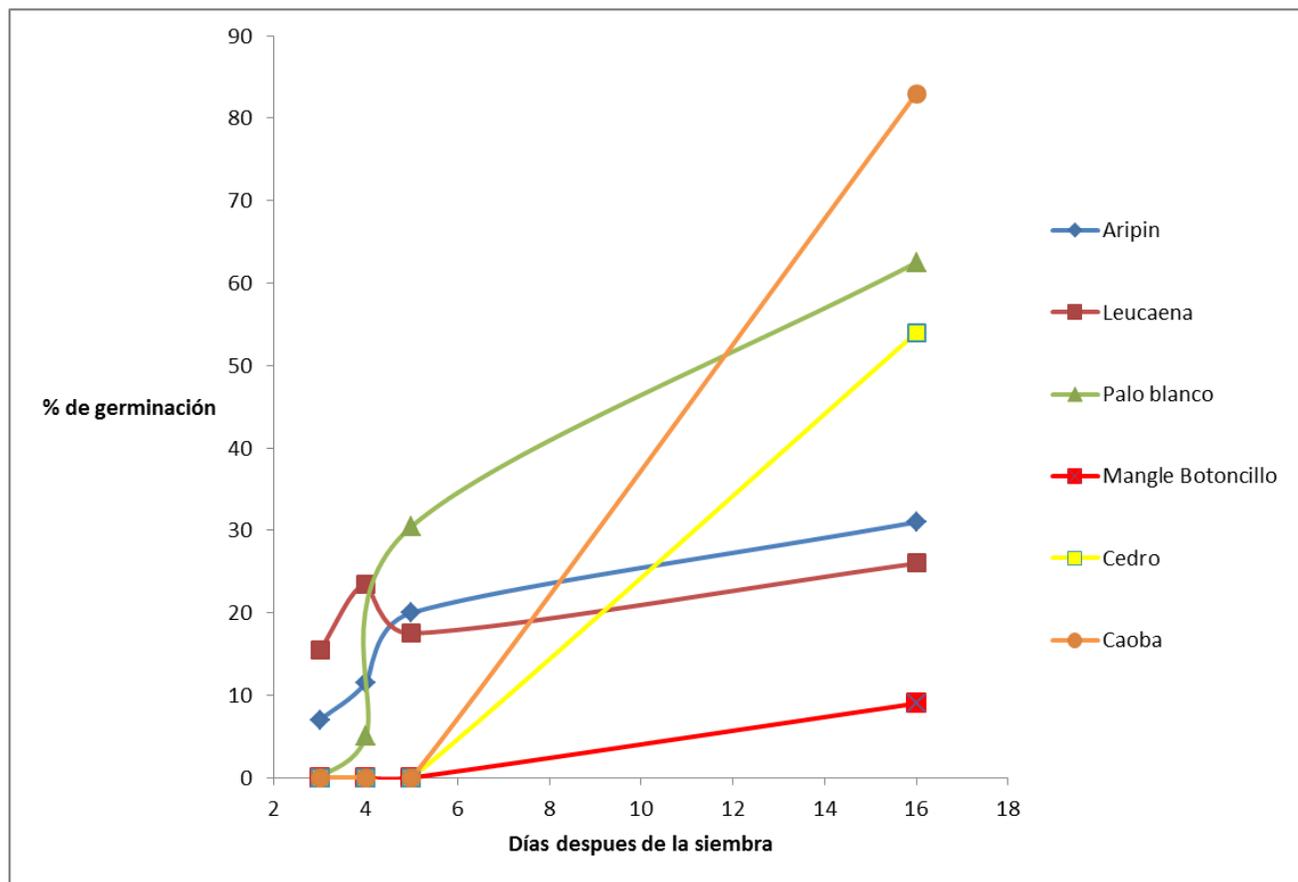


Figura 50: Porcentajes de germinación de semillas botánicas forestales

Se sabe que *C. erectus* produce una alta cantidad de semillas, pero muchas de ellas son abortadas o no germinan, por lo que la viabilidad de las semilla se demuestra que es menor del 12% (Ellison, Farnsworth y Moore 2010).

En el mes de junio (época lluviosa) se realizó la segunda fase, en esta se evaluaron 5 tratamientos con 3 repeticiones.

Tratamiento 1: testigo

Tratamiento 2: lavado de semillas durante 7 días

Tratamiento 3: lavado de semillas durante 15 días

Tratamiento 4: Aplicación de ácido giberélico al 0.05%

Tratamiento 5: Aplicación de nitrato de potasio al 0.2%

Obteniendo así los siguientes resultados (cuadro 33):

**Cuadro 33: Resumen de los porcentajes de germinación**

		Tratamientos (i)				
		T1	T2	T3	T4	T5
repeticiones (j)	1	10	0	3	4	8
	2	5	4	3	6	3
	3	4	6	5	2	4
Promedio		6.33	3.33	3.67	4	5

El análisis de varianza (ANDEVA) se presenta en el cuadro 34:

**Cuadro 34: Análisis ANDEVA**

Fuentes de variación (FV)	Grados de libertad (gl)	suma de cuadrados (SC)	Cuadros medios (CM)	Valor Fcal	Valor Ftab
Tratamientos	4	17.73	4.43		
Error	10	64	6.4	<b>0.69</b>	<b>3.63</b>
Total	14	81.73			

Lo anterior indica que los tratamientos evaluados no tienen diferencia significativa, por lo que se acepta la hipótesis nula, es decir que ninguno de los tratamientos incrementó el porcentaje de germinación de Mangle botoncillo (*Conocarpus erectus*).

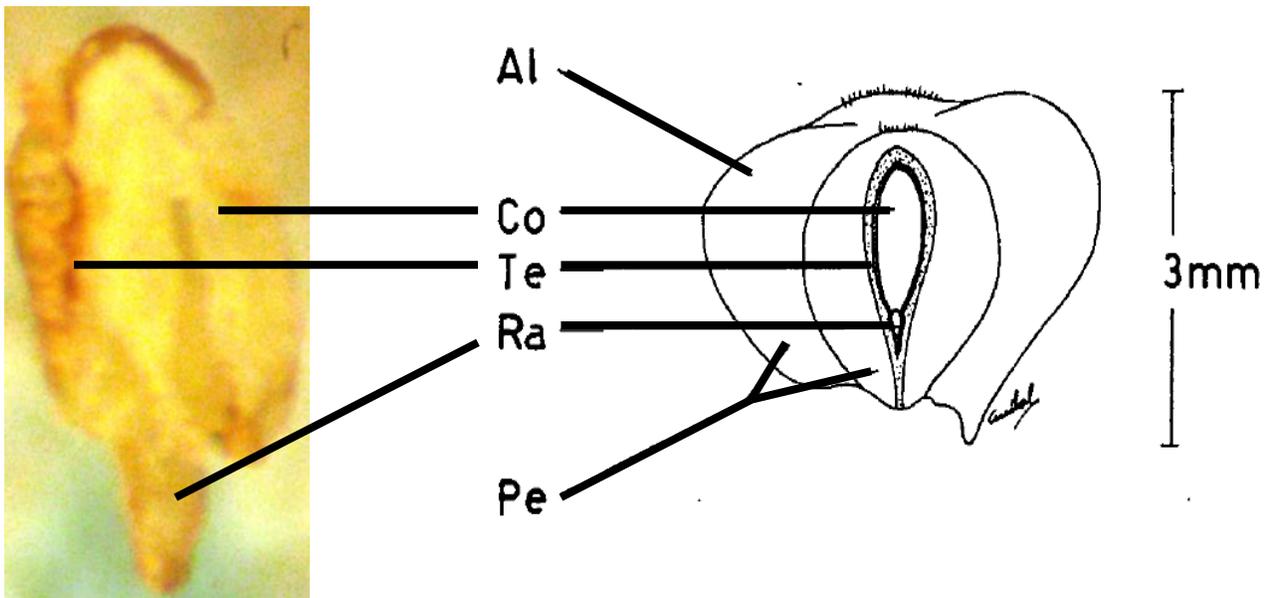
## B. Factores limitantes en la germinación

Al realizar cortes longitudinales y transversales a 100 nuececillas de *C. erectus* se obtuvieron los siguientes resultados (cuadro 35).

**Cuadro 35: porcentaje de frutos con semillas**

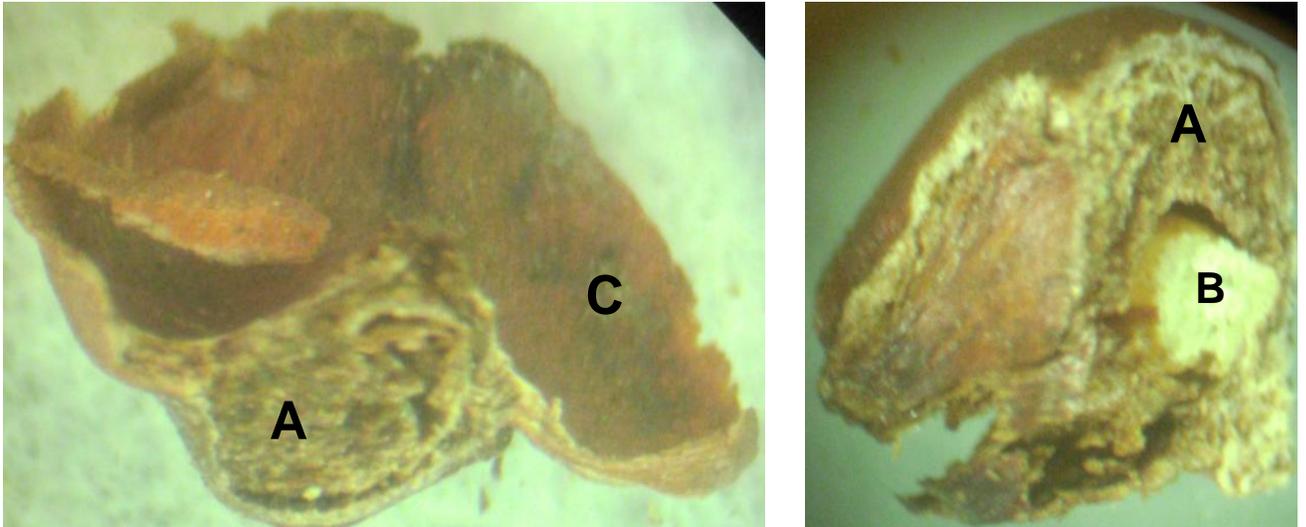
Frutos	Numero de semillas
Con semillas	8
Sin semillas	92

El bajo porcentaje (< 10%) de frutos que presentaron semillas bien formadas (figura 51) explica el bajo porcentaje de germinación obtenido en las pruebas anteriores.



**Figura 51: Corte longitudinal a través de la semilla (A) y fruto (B) de *Conocarpus erectus*. Al, ala; Co, cotiledones; Te, testa; Ra, radícula; Pe, pericarpio. Fuente: Adaptado de INE, 1983. Foto por Alma Santos, 2013.**

Esta disección permitió observar las cavidades del fruto llenas de tejido esponjoso (figura 52A), que le permiten flotar. Según Muñoz, Orta y Calvo (1991) existen dos cavidades exteriores pequeñas y aladas, la central determina la estructura de la semilla y recepción al embrión que la ocupa casi totalmente cuando está presente (figura 52B).



**Figura 52: Corte transversal y longitudinal de frutos y semillas de *C. erectus*. A: tejido esponjoso, B: semilla y C) alas**

A demás según Muñoz, Orta y Calvo (1991) la distribución de semillas llenas y vanas por fruto se presentan en el cuadro 36, donde se observa que la posibilidad de encontrar semillas llenas es mayor en la región ecuatorial del fruto.

**Cuadro 36: porcentaje de semillas llenas y vanas por regiones del fruto**

Tipo de semilla	Ápice	Ecuador	Base	Total
Llenas	10.1	17.1	10.2	13
Vanas	89.9	82.9	89.8	87

Fuente: adoptado de Muñoz, Orta y Calvo (1991)

### 3.1.7 Conclusiones

1. Los tratamientos germinativos para *Conocarpus erectus* no mostraron incrementos en el porcentaje de germinación. El tratamiento testigo fue el que mostró el mayor porcentaje de germinación con un 6.33%, seguido del tratamiento con nitrato de potasio al 0.2%, con un 5%, el tratamiento con ácido giberélico al 0.05% con un 4% y finalmente los tratamientos de lavado de semillas con 7 y 15 días, dieron resultados del 3.33 y el 3.67% respectivamente.
2. El principal factor que limita la germinación de las semillas botánicas de *C. erectus*, se debe a que más del 90% de las semillas son vanas o con presencia de un embrión mal formado.

### 3.1.8 Recomendaciones

1. Realizar un estudio detallado sobre la polinización de esta especie, donde se incluya la época en que las partes reproductivas de la flor (androceo y gineceo) estén activas y así eliminar la posibilidad de que las flores sean proginas o proandras; tipo de polinizadores (viento, agua, insectos, aves o animales) y relación existente entre polen y ángulo de recepción del estigma u frutos.
2. Estudiar la biología de la especie (conocer si esta es dioica o monoica)
3. Realizar pruebas de germinación con semillas botánicas provenientes de otros lugares y en diferentes épocas.

### 3.1.9 Bibliografía

1. Agraz Hernández, C; Noriega Trejo, R; López Portillo, J; Flores Verdugo, F y Jiménez Zacarías, J. 2006. Guía de campo: identificación de manglares en México, Universidad Autónoma de Campeche.
2. Basáñez Muñoz, A; Dominguez Barradas, C; Serrano Solín, A y Gonzáles Gándara, C. 2011. Germinación de semillas de *Conocarpus erectus* Var. *Sericeus*: E. Forst. Ex DC en condiciones de laboratorio. En *Polibotánica* (págs. 61-70). México, Instituto politécnico nacional.
3. CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CR). (2000). Técnicas para la germinación de semillas forestales. Costa Rica, CATIE.
4. DRNA (Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, PR). 2009. Los manglares: hojas de nuestro ambiente. Perú. 203 p.
5. Ellison, A; Farnsworth, E; y Moore, G. (2010). Recuperado el 6 de 3 de 2013, de Lista roja de la UICN de especies amenazadas: <http://www.iucnredlist.org/details/178806/0>
6. Guatemalaforestal. 2010. Bosques. Recuperado el 04 de 09 de 2013, de <http://guatemalaforestal.com/>
7. Herrera, J; Alizaga, R; Guevara, E; y Jiménez, V. 2006. Germinación y Crecimiento de la planta. San José, C.R, Universidad de Costa Rica.
8. INE. 1983. Reunión sobre problemas en semillas tropicales. México, D. F. : Instituto nacional de ecología.
9. Kameswara Rao, N; Jean Hanson, M; Ehsan Dulloo, M; Kakoli Ghosh, D. N; y Larinde, M. 2007. Manual para el manejo de semillas en bancos de germoplasma. Roma, Italia, IPGRI. 143 p.
10. Luther, E. 2001. Árboles comunes de Puerto Rico y las Islas Vírgenes . Puerto Rico. 95 p.
11. MARN (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, GT). 2013. Informe técnico: estudio de la cobertura de mangle en la república de Guatemala. Guatemala, MARN. 68 p.
12. Mera Orcés, V. 1999. Género, manglar y subsistencia. Wageninge: H y A.
13. Moreno Casasola, P; y Infante Mate, D. M. 2009. Manglares y selvas inundables. Veracruz, México: Instituto de Ecología, A.C.

14. Muñoz, B; Orta, R; y Calvo, E. 1991. Potencial germinativo de semillas de *Conocarpus erectus* L. Efecto de la salinidad y temperatura del sustrato. En *Ciencias biológicas* (págs. 88-95). Cuba: Instituto de ecología y sistemática.
15. Pérez García, F, y Pita Villamil, J. M. 2006. Viabilidad, vigor, longevidad y conservación de semillas. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
16. T, D. P., & J, S. (2005). *Arboles tropicales de México*. México: UNAM.
17. Tovilla Hernández, C; y Lanza Espino, G. 1999. Ecología, producción y aprovechamiento del mangle *Conocarpus erectus* L. en la barra de Tecoaapa Guerrero, México. En C. Tovilla Hernández, & G. Lanza Espino, *Biotropica* (págs. 121-134). México: Ecología tropical.
18. Vásquez Rodríguez, A. 2007. *Producción forestal* . San Jospe, C. R. : Universidad Estatal a Distancia.

## **3.2 SERVICIO 2: ESTABLECER INFORMACIÓN BASE PARA GENERAR UNA BASE DE DATOS SOBRE USOS Y USUARIOS DEL AGUA DEL RÍO CRISTÓBAL**

### **3.2.1 Introducción**

Guatemala cuenta con una extensión territorial de 108,889 km<sup>2</sup>; su orografía es compleja y abundante, pues cerca de tres cuartas partes de su territorio son montañosas. Además tiene 33 volcanes, varios de ellos activos. Las fuentes superficiales de agua de este país están distribuidas en tres regiones hidrográficas que comprenden 38 cuencas fluviales y 194 cuerpos de agua continentales (PREPAC, 2005). En cuanto a las aguas subterráneas se tienen cuatro regiones hidrogeológicas (GWP, 2011).

Guatemala posee abundancia de agua, con 18 ríos principales que se originan en las partes altas de los volcanes. Debido a la lluvia y a la abundancia de recursos de agua, existe la cantidad de agua necesaria para cubrir la demanda, sin embargo, no hay un buen manejo de los recursos para desarrollar y mantener los requerimientos de suministro de agua (Motta, 2010). Prueba de ello, es que del total de caudal que tiene Guatemala, alrededor de 93,391 metros cúbicos de agua al año, se reduce a 32,700 metros cúbicos de agua al año (casi el 40% del caudal bruto disponible en el país), de este el 1% se destina a uso doméstico, 3% se destina al uso industrial, 6% al uso agrícola, y un 13% se utiliza para la producción de electricidad por medio de hidroeléctricas, esto da un uso del 23% del caudal disponible neto, dejando un excedente del 77%, o sea alrededor de 25,000 metros cúbicos de agua al año. Esta cifra es muy importante para considerar las oportunidades que se tienen para utilizar el recurso de forma productiva, aportando al desarrollo económico del país, sin embargo, antes se debe analizar muy detalladamente si los usuarios de los recursos hídricos actualmente cubren los costos que genera al sistema, sobre todo en el tema de contaminación (Benavides, 2012).

Por lo anterior y como parte de una de las áreas de trabajo del programa de Manejo Integrado de Cuencas, del Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático – ICC-, es necesario establecer la información necesaria para generar una base de datos que contenga la descripción detallada de los usos y usuarios del agua en la subcuenca

Cristóbal (cuenca Coyolate), para así iniciar acciones con todos los sectores que permita hacer incidencia en el manejo integrado del recurso hídrico.

### 3.2.2 Marco teórico

#### A. Recurso hídrico en Guatemala

Según el INE, 2011, citado por Benavides, 2012, la disponibilidad de fuentes de agua excede a su uso actual, sin embargo, si la población continua con niveles muy altos de contaminación y desperdicio de los recursos hídricos, se puede esperar que en el futuro próximo, se tengan problemas de abastecimiento de agua.

Además, se debe destacar que la distribución de agua entre sus diferentes usos, deja sólo una pequeña porción para el consumo humano (cuadro 37), situación que refleja la necesidad de una mejor comprensión del uso del agua en Guatemala.

**Cuadro 37: Aprovechamiento de los recursos hídricos en Guatemala.**

	<b>MILLONES M<sup>3</sup></b>	<b>%</b>		<b>MILLONES M<sup>3</sup></b>	<b>%</b>
<b>CAUDAL BRUTO DISPONIBLE</b>	<b>93391</b>	<b>100</b>	<b>Disponibilidad neta</b>	<b>32689</b>	<b>35</b>
<b>FUENTE SUBTERRÁNEA</b>	53366	57	Uso doméstico	326	1
<b>FUENTE SUPERFICIAL</b>	40025	43	Uso industrial	929	3
<b>REDUCCIÓN DEL CAUDAL</b>	<b>60702</b>	<b>65</b>	Uso agrícola	1886	6
<b>ECOSISTEMAS CONTAMINACIÓN</b>	23347	25	Electricidad	4511	13
<b>DISPONIBILIDAD NETA</b>	<b>32689</b>	<b>35</b>	<b>Uso total</b>	<b>7652</b>	<b>23</b>
			<b>Excedente</b>	<b>25037</b>	<b>77</b>

Fuente: Benavides, 2012

Del total de caudal que tiene Guatemala, alrededor de 93,391 metros cúbicos de agua al año, existe una reducción natural atribuible al mantenimiento que hacen de sí mismo los ecosistemas, especialmente en la zonas de recarga hídrica (25% del caudal bruto disponible). Sin embargo, existe una fuerte reducción del caudal, muy preocupante para Guatemala, y es la provocada por la contaminación del recurso, siendo aproximadamente el 40% del caudal bruto disponible en el país. Esto deja un remanente del 35% del caudal, disponible para usos diversos, siendo alrededor de 32,700 metros cúbicos de agua al año. En cuanto al caudal neto disponible, 1% se destina a uso doméstico, 3% se destina al uso industrial, 6% al uso agrícola, y un 13% se utiliza para la producción de electricidad por medio de hidroeléctricas, esto da un uso del 23% del caudal disponible neto, dejando un excedente del 77%, alrededor de 25,000 metros cúbicos de agua al año. Esta cifra es muy importante, para considerar las oportunidades que se tienen para utilizar el recurso de forma productiva, aportando al desarrollo económico del país, sin embargo, antes se debe analizar muy detalladamente, si los usuarios de los recursos hídricos actualmente cubren los costos que genera al sistema, sobre todo en el tema de contaminación (Benavides, 2012).

Por su orografía, Guatemala se divide en tres vertientes de escurrimiento superficial: Pacífico, Atlántico o Caribe y Golfo de México (figura 53). La vertiente del Pacífico, en su parte alta está conformada por los valles del altiplano central del país, que drenan tanto a esta vertiente como a la del Atlántico y a la del Golfo de México; los cauces atraviesan la cadena volcánica para drenar finalmente en la planicie costera, hasta llegar al Océano Pacífico. En general las cuencas son angostas, con fuertes pendientes en la parte media y con una pendiente muy suave en la parte baja. Las cuencas de esta vertiente se ven caracterizadas por una rápida respuesta a las precipitaciones y un alto grado de sedimentación en la planicie costera, incrementado por la alta disponibilidad de sedimentos producto de los volcanes activos. Los cauces corren perpendiculares a la costa y a la cadena volcánica (IARNA, 2004).

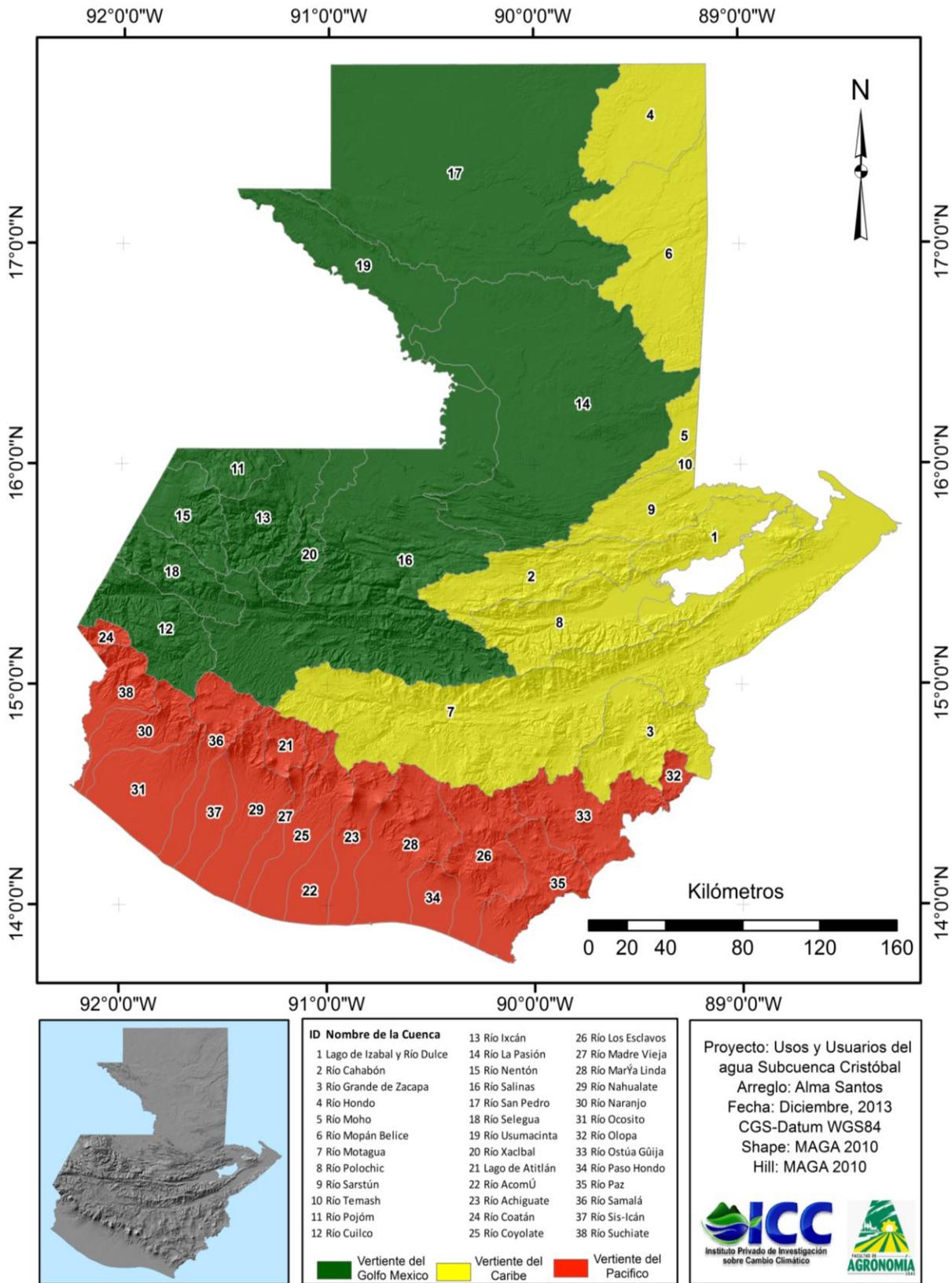


Figura 53: Cuencas hidrográficas de Guatemala

La vertiente del Atlántico o del mar Caribe incluye los ríos con mayor longitud, en el territorio guatemalteco. En general las cuencas están muy bien definidas; en las partes altas tienen fuertes pendientes, que van drenando para convertirse en ríos sinuosos, con valles inundables en las partes más bajas cerca de la desembocadura. Las condiciones orográficas hacen que en esta vertiente se tenga una de las zonas más secas del istmo centroamericano.

La vertiente del Golfo de México es la más grande del país y contiene cuencas que cruzan la frontera con México; son las cuencas más extensas y más caudalosas, y, todas conforman finalmente el río Grijalva en México.

La orografía facilita la conformación de lagos y lagunas, el país cuenta con 1,151 sistemas lacustres con 7 lagos, 365 lagunas y 779 lagunetas; el lago de Izabal es el más grande con 589.6 km<sup>2</sup>. Los sistemas lacustres que sobresalen por su superficie y belleza, son los de Izabal, Atitlán en la altiplanicie del país y al norte, el lago Petén Itzá, rodeado de selvas tropicales que le imprimen una particular belleza (IARNA 2004).

Según Castañeda y Arteaga, 2000, citado por IARNA, 2004, El potencial de agua subterránea, calculado con base en el índice de infiltración, se estima en 33,699 millones de m<sup>3</sup>, dato que concuerda con los datos generados por SEGEPLAN en el 2006<sup>2</sup>. Los acuíferos aluviales de la costa pacífica se estiman de mayor rendimiento y algunos están en el altiplano (los más estudiados), donde el agua subterránea representa la fuente de abastecimiento más utilizadas.

Las aguas subterráneas están divididas en cuatro regiones hidrogeológicas: i) las llanuras aluviales cuaternarias de Costa Sur, que consideran como las formaciones con mayor potencial de estas aguas; ii) el altiplano volcánico de rocas terciarias y cuaternarias, las cuales tienen depresiones tectónicas rellenas con depósitos piroclásticos que forman el altiplano. Aquí el potencial de ocurrencia de aguas tienen lugar a profundidades

---

<sup>2</sup> SEGEPLAN-BID. 2006. Estrategia para la gestión integrada de los recursos hídricos de Guatemala. Diagnóstico. 83 p.

relativamente grandes; iii) la cadena montañosa de tierras cristalinas, de rocas ígneas graníticas y metamórficas, que es la formación con menor ocurrencia del país; iv) la región sedimentaria del Norte, de rocas calizas del cretácico karstificadas, donde el agua subterránea se halla en conductos kársticos, y que a pesar de su importancia, su dinámica ha sido poco estudiada (GWP, Asociación mundial para el agua, 2011)

## **B. Evaluación de los recursos hídricos**

El país tiene una oferta o disponibilidad bruta de agua equivalente a 97.120 Mm<sup>3</sup><sup>3</sup> En la vertiente del Océano Pacífico, la oferta es de 22.973 Mm<sup>3</sup> (23,7%), en la del Golfo de México, de 40.922 Mm<sup>3</sup> (42,2%) y en la del mar Caribe, de 33.224 Mm<sup>3</sup> (34,28%). La demanda total, correspondiente al uso consuntivo y no consuntivo, es de 9.596 Mm<sup>3</sup>, menos del 10% de la oferta total. Las demandas consuntivas son de 5.143 Mm<sup>3</sup> (53.6% de la demanda total), de las cuales, el riego utiliza 3,957 Mm<sup>3</sup> (77%), el consumo humano anual, 835 Mm<sup>3</sup> (16%), y la industria y las otras actividades económicas, 351 Mm<sup>3</sup>, es decir, el restante 7%.

Por lo que respecta a la demanda no consuntiva, esta es de 4.453 Mm<sup>3</sup>, que representa el 46.4% de la demanda total. Como lo reflejan las cifras antes citadas, el principal uso del agua en el país es el riego. Actualmente, 310,00 hectáreas son irrigadas, lo que representa cerca del 24% del área apta en el país para este uso. Los dos sistemas de riego que más demandan agua son el de inundación y el de aspersion (84,7%). Este uso del agua tiene la mayor demanda en la vertiente del Océano Pacífico, región en la que utiliza el 71,8%. Si bien el riego por inundación (39,1%) continúa siendo importante, este ha sido superado por el riego por aspersion, el cual demanda el 45,6% del agua. También el país cuenta con sistemas de riego por goteo, los cuales aumentan la eficiencia en el uso del agua. Las aguas de retorno, provenientes del riego por infiltración, son aproximadamente 1.467 Mm<sup>3</sup>, es decir, alrededor del 30% del volumen total utilizado. Finalmente, por lo que respecta al tipo de usuario, este es del sector privado (GWP, Asociación mundial para el agua, 2011).

---

<sup>3</sup> Los datos de balance hídrico presentado anteriormente por el IARNA, 2004, difieren de los datos que se presentan por GWP, 20011, por los razonamientos que se acompañan en este documento.

**Cuadro 39: Oferta y uso de agua por vertiente en Guatemala. Situación para el mes más seco. Fuente: adoptado de SEGEPLAN-BID, 2006**

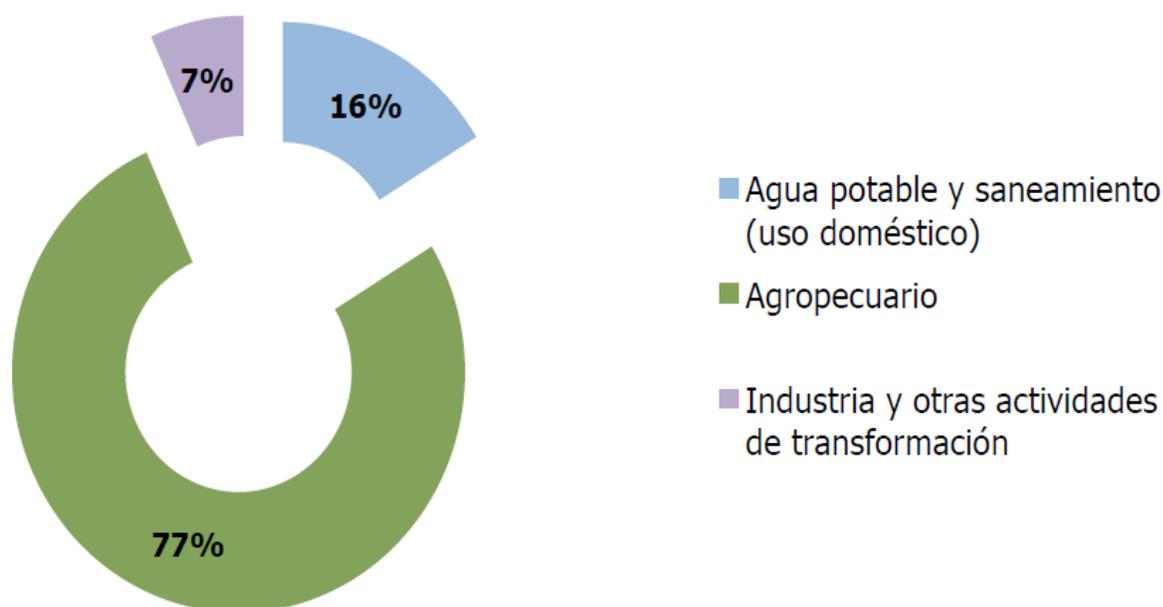
Concepto	Indicadores	Vertiente			Total País	Estiaje (marzo o abril)			Total País
	Caudal (m³/s)	Pacífico	G. México	M. Caribe	Volumen (Mm³)	Pacífico	G. México	M. Caribe	Volumen (Mm³)
		Volumen (Mm³)				Volumen (Mm³)			
<b>I. Capital hídrico</b>	3.079,65	22.973,03	40.922,06	33.224,75	97.119,84	755,28	1.042,67	846,55	2.644,50
V. del Pacífico	728,47					755,28	1,042,67	846,55	2.644,50
Golfo de México	1.297,63								
Mar Caribe	1.053,55								
<b>II. Total demandas consuntivas o no</b>		5.346,24	1.783,45	2.466,38	9.596,07	698,19	159,59	277,00	1.134,78
<b>III. Total demandas de uso consuntivo</b>		3.758,74	278,82	1.105,08	5.142,64	565,90	34,21	163,56	763,66
a. Agua potable y saneamiento	Hogares País	485,22	132,50	216,90	834,62	40,43	11,04	18,08	69,55
b. Uso agropecuario		2.977,06	130,41	849,62	3.957,09	500,76	21,84	142,27	664,87
c. Industria y otras actividades de transformación		291,28	13,84	37,51	342,63	24,27	1,15	3,13	28,55
d. Minería		0,00	0,60	0,30	0,90	0,00	0,05	0,03	0,08
Mina de oro-Marlin (estimación)	822 m3/día	0,00	0,30	0,00	0,30	0,00	0,03	0,00	0,03
e. Otras actividades económicas		5,18	1,48	0,74	7,40	0,43	0,12	0,06	0,62
<b>IV. Total demanda no consuntiva</b>		1.587,50	1.504,63	1.361,30	4.453,43	132,29	125,39	113,44	371,12
a. Energía	Caudal	1.587,50	1.504,63	1.361,30	4.453,43	132,29	125,39	113,44	371,12
Energía hidráulica	141,21	1.587,33	1.504,63	1.361,30	4.453,26	132,28	125,39	113,44	371,11
Energía térmica (excepto ingenios cogeneradores)	3.910 millkv/h	0,17	0,00	0,00	0,17	0,01	0,00	0,00	0,01
<b>V. Aguas de retorno de riego (infiltración)</b>		1.097,45	49,21	320,61	1.467,27	182,91	8,20	53,44	244,56
<b>VI. Generación Aguas contaminadas</b>		1.060,94	137,63	340,90	1.539,47	129,57	13,31	40,43	183,31
Origen doméstico		388,17	106,00	173,52	667,69	32,35	8,83	14,46	55,64
Origen agropecuario		493,85	22,15	144,28	660,27	82,31	3,69	24,05	110,05
Origen de otras actividades económicas		4,14	1,18	0,59	5,92	0,35	0,00	0,05	0,49
<b>Saldo (Superávit o déficit)</b>		21.372,68	40.830,08	32.781,18	94.983,94	501,86	1.029,98	776,86	2.308,69

Según cálculos referidos al 2006, en Guatemala se emplean anualmente 5,143 millones m<sup>3</sup> de agua, es decir, el 5% del capital hídrico del país (97,120 millones m<sup>3</sup>) con fines agropecuarios, principalmente para el riego de cereales, caña de azúcar, café, hortalizas y

legumbres (3,957 millones de m<sup>3</sup>, 77%); domésticos (835 millones de m<sup>3</sup>, 16%) e industriales u otras actividades de transformación (351 millones de m<sup>3</sup>, 7%) (Figura 54).

La comparación entre la proporción del consumo del agua de la agricultura y de la industria y la participación en el PIB de estos sectores, señala un uso ineficiente de este recurso (IARNA, 2009)

**Figura 54: Distribución de usos consuntivos del agua**



Fuente: IARNA, 2009

El uso consuntivo demanda el 23% del volumen generado en la vertiente del océano Pacífico, el 4% del generado en la vertiente del golfo de México y el 7% del generado en la vertiente del mar Caribe (SEGEPLAN, 2006). Es relevante la coincidencia de la alta proporción de la demanda por el sector agropecuario, la mayor demanda del volumen generado de agua en la vertiente del océano Pacífico y la alta proporción del agua demandada para riego en esta vertiente (Cuadro 40). La demanda de agua del sector doméstico, el segundo más demandante del recurso, se estima tomando como criterio

básico de estimación 100 y 200 litros/persona/día en el área rural y urbana respectivamente (cuadro 41) (IARNA, 2009).

**Cuadro 40:** demanda de agua para riego según sistema de riego y vertiente. Mm<sup>3</sup>

Vertiente	Total	%	Aspersión	Goteo	Inundación	Otro sistema
Pacífico	2,744	72	1,450	44	1,052	196
Golfo de México	123	7	60	1	40	23
Mar Caribe	801	21	231	21	403	147
Total	3,668	100	1,741	66	1,495	366
% del total	100		47	2	41	10

Fuente: SEGEPLAN, 2006

**Cuadro 41:** demanda de agua en el sector doméstico. Mm<sup>3</sup>

Tipo de abastecimiento	Demanda anual (millones de m <sup>3</sup> )	Urbano (litros/persona/día)	Rural (litros/persona/día)
Tubería servicio domiciliar	733	200	100
Tubería servicio varios hogares	29	100	75
Tubería servicio comunal (fuera casa)	21	100	75
Pozo	40	0	50
Camión o tonel	3	25	25
Río, lago o manantial	6	25	25
Otro tipo	3	25	25
<b>Total</b>	<b>835</b>		

Fuente: SEGEPLAN, 2006

### **3.2.3 Objetivos**

#### **A. Objetivo general**

Establecer información estratégica para generar una base de datos sobre usos y usuarios del agua, de la cuenca del río Cristóbal.

#### **B. Objetivos específicos**

- Realizar una descripción general de la situación del recurso hídrico, en la cuenca del río Cristóbal.
- Establecer la información necesaria para generar una base de datos sobre los principales usos y usuarios del agua de la subcuenca Cristóbal.

### **3.2.4 Metodología**

#### **A. Descripción general de la situación del recurso hídrico en la subcuenca del río Cristóbal**

Utilizando los shapes de centros poblados generados por el MAGA, 2010 y el programa Arc Gis 10, se trasladó la capa shape al formato Kml, el cual fue utilizada como base en la digitalización de las principales comunidades, comercios, fábricas y cultivos localizados en las imágenes proporcionadas por Google Earth, ya que este presenta información actualizada.

##### **a. División de la subcuenca**

Debido a la extensión de la subcuenca Cristóbal, esta se estudió por cada una de sus microcuencas que la conforman, según los principales ríos. Para esto se realizó una revisión en gabinete de las áreas, para lo cual se utilizó como base el shape de cuencas del MAGA, 2010.

##### **b. Digitalización de las principales corrientes**

Utilizando el programa ArcGis 10, se trasladó la capa shape de microcuencas que conforman la subcuenca Cristóbal al formato Kml, el cual fue utilizada como base en la digitalización de las principales corrientes, desvíos, y vasos de almacenamiento de agua localizados en las imágenes proporcionadas por Google Earth, ya que este presenta información actualizada.

#### **B. Establecer la información necesaria para generar una base de datos sobre los usos y usuarios del agua de la Cuenca del Río Cristóbal**

Esta parte consistió en realizar una revisión bibliográfica para recopilar la información necesaria, que describa los usos u usuarios del agua en la cuenca del Río Cristobal.

### 3.2.5 Resultados

#### a. Descripción general de la situación del recurso hídrico en la subcuenca del río Cristóbal

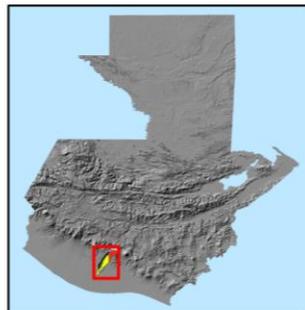
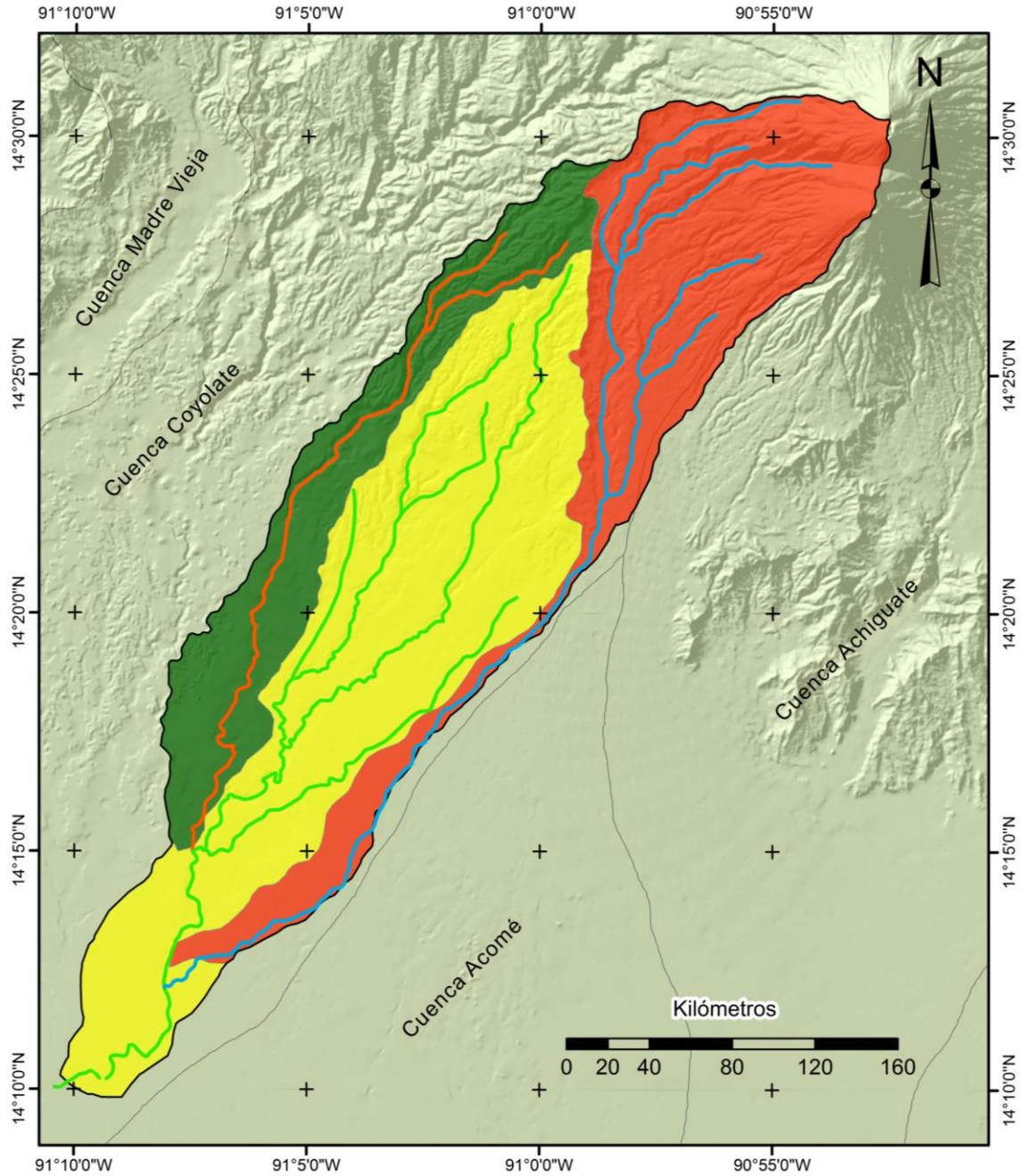
La subcuenca Cristóbal forma parte de la cuenca Coyolate, ésta es una de las 18 cuencas de la vertiente del Océano Pacífico. Según FAO, 2000, la vertiente del Pacífico representa un 22% del territorio nacional, por lo que se estima que la Subcuenca Cristóbal ocupa un 1.7% aproximadamente de la vertiente del pacífico.

La precipitación promedio anual excede los 4000 mm en la parte media de la subcuenca, en los meses extremos altitudinales tiende a los 2000 mm anuales, siendo los meses de mayo a octubre los de mayor actividad lluviosa. En lo que respecta a evapotranspiración esta oscila entre los 600 mm y 1800 mm en los extremos de la cuenca, con valores promedio en el estrato medio de 1400-1600 m anuales. Los problemas más críticos de déficit de agua en los meses no lluviosos, de noviembre a abril, se dan para la parte baja, donde se concentran las áreas de cultivos intensivos (Estrada, Hernández, Guzmán, & García, 2013).

Dentro de la Subcuenca Cristóbal se encuentran 3 microcuencas, siendo las siguientes: a) Microcuenca Aguná, b) microcuenca Cristóbal y c) microcuenca Pantaleón (figura 55). El principal río de la subcuenca es el río Pantaleón, el cual cuenta con una longitud aproximada de 45 km, desde su nacimiento en el cono del Volcán de Fuego hasta que tributa con el Río Cristóbal, cerca de la Aldea Las Playas. Según Estrada, Hernández, Guzmán y García (2013) el Río Pantaleón presenta un caudal mayor a los demás con 16.94 m<sup>3</sup>/s siendo el que presenta mayor problemas a inundación afectando la producción de los cultivos y centros poblados aledaños al área del mismo.

#### b. Usuarios del agua de la subcuenca Cristóbal

Dentro de los usuarios mayoritarios del agua en la Cuenca del Ríos Cristóbal, se encuentran centros poblados, áreas de cultivo anual y perenne, además de centros industriales (figura 56).



Proyecto: Usos y Usuarios del agua Subcuenca Cristóbal  
Arreglo: Alma Santos  
Fecha: Diciembre, 2013  
CGS-Datum WGS84  
Shape: MAGA 2010  
Hill: MAGA 2010

Figura 55: Microcuencas y red hídrica principal de la Cuenca del Río Cristóbal

La Cuenca del Río Cristóbal, según proyecciones para el 2012, del Instituto Nacional de Estadística (año base 2002), tenía una población total de 50,855 habitantes derivado de centros poblados de tres municipios (Santa Lucía Cotzumalguapa, Siquinalá y Santa Lucía Cotzumalguapa), de dos distintos departamentos: Escuintla y Chimaltenango. Los poblados van desde aldeas, fincas, caseríos, parcelamientos, colonias, granjas, haciendas entre otros, hasta grandes centros poblados como San Pedro Yepocapa y Santa Lucía Cotzumalguapa. En el cuadro 42, se detalla la cantidad de habitantes por municipio pertenecientes a la cuenca del Ríos Cristóbal.

**Cuadro 42: Población neta por municipio de la Cuenca del Río Cristóbal**

<b>Municipio</b>	<b>Población total del municipio</b>	<b>Población dentro de la Cuenca</b>	<b>%</b>
Sata Lucía Cotzumalguapa	129,341.00	35,829.00	27.70
Siquinalá	23,047.00	803.00	3.48
San Pedro Yepocapa	32,085.00	14,223.00	44.33
<b>Total</b>	<b>184,473,.00</b>	<b>50,855.00</b>	<b>100,00</b>

Fuente: Adoptado de Estrada, Hernández, Guzmán, & García, 2013

Según el mapa de usos actual, 2013, elaborado para este estudio, la superficie de la cuenca del Río Cristóbal se encuentra ocupada en un 43% con cultivo anual (caña de azúcar), siendo este cultivo uno de los mayores demandantes del recurso hídrico; además los dos centros poblados que demandan una mayor cantidad de agua potable (municipio de San Pedro Yepocapa y Santa Lucía Cotzumalguapa).

Dentro de la Cuenca del Río Cristóbal se encuentran centros industriales dedicados a la transformación de materia prima, pertenecientes a la agroindustria azucarera de Guatemala, que utilizan el agua proveniente de los ríos Pantaleón y Cristóbal

principalmente, entre los que se encuentra el Ingenio Pantaleón, el Ingenio La Unión y el Ingenio Madre Tierra.

En el cuadro 43, se detalla la descripción del mapa (figura 56) de uso actual de la cuenca del Río Cristóbal.

**Cuadro 43: Uso actual de los suelos, Cuenca del Río Cristóbal, 2013**

Descripción	Área		%
	Ha	Km <sup>2</sup>	
Bosque natural	5654.25	55.54	13.78
Café	6576.26	64.76	16.06
Caña de azúcar	17510.70	174.03	43.16
Ceniza volcánica	455.57	4.56	1.13
Centro poblado	2229.33	22.29	5.53
Cultivo forestal	6742.33	67.42	16.72
Lecho del rio	347.37	3.47	0.86
Pasto cultivado	1112.65	11.13	2.76
<b>Total</b>	<b>40628.46</b>	<b>403.21</b>	<b>100.00</b>

#### d. Usos del agua de la subcuenca Cristóbal

Como se observa en la figura 55, la cuenca del Río Cristóbal está constituida por tres microcuencas, definidas por la red hídrica superficial. Los principales ríos son: el río Pantaleón, el río Cristóbal y el río Aguná.

Dentro de los usos principales que se le da al agua, se encuentran para el consumo humano (agua potable), para riego de cultivos y procesos industriales.

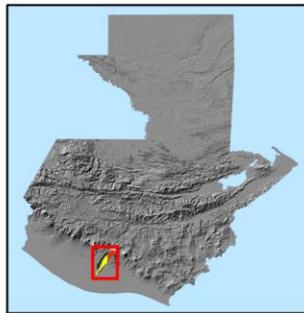
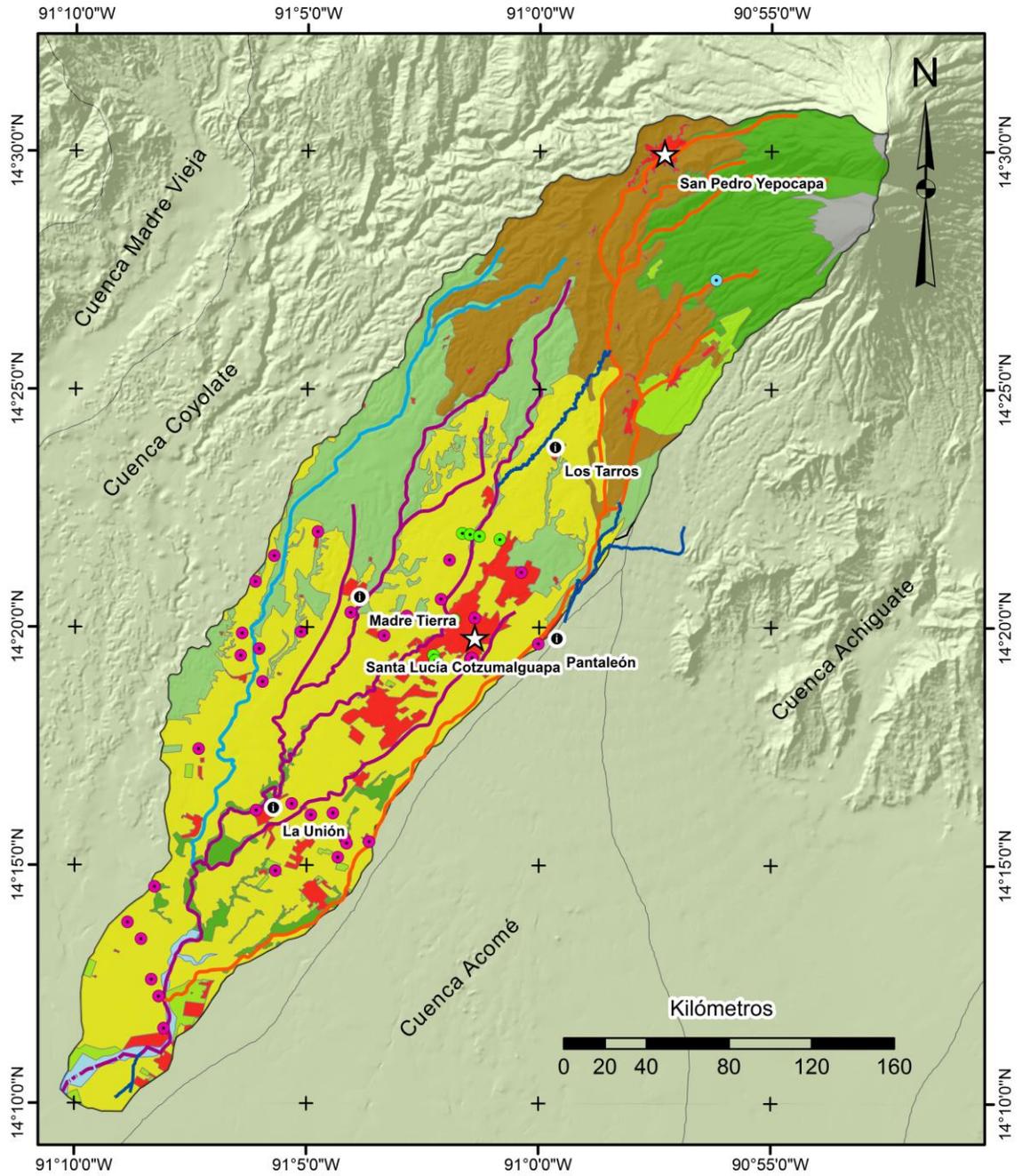
Según SEGEPLAN, 2011, citado por Mena, R. (2013), para el 2010 el municipio de Santa Lucía logró cubrir de forma general el 76% de la demanda domiciliar de agua potable. En el casco urbano cubrió el 85% y en el área rural 65% de la demanda de agua, la demanda restante se abasteció por otras fuentes como pozos artesanales, ríos, arroyos y nacimientos. El Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social estimó que existían

aproximadamente 7,069 pozos artesanales en el municipio. El casco urbano se abasteció por dos sistemas de agua, mientras que el área rural, únicamente cinco comunidades y cuatro aldeas contaban con sistema de abastecimiento de agua. El agua del área urbana recibe un tratamiento a base de cloro (gas elemental), que le brinda adecuadas características de calidad de agua para uso, se transporta y distribuye por un sistema de gravedad; a diferencia del área rural, que como se mencionó en su mayoría utilizan pozos y su distribución es por bombeo de pozos mecánicos (SEGEPLAN, 2011).

Según Mena, R. (2013), un estudio de aforos en los tanques de distribución realizado por el Instituto de Fomento Municipal antes del 2010, determinó que las fuentes aportaron 150 litros de agua por segundo al sistema, mientras que los pozos de agua subterránea aportaron 15 litros por segundo.

No existe ningún tratamiento adicional al agua procedente de los nacimientos además de la cloración; en invierno se deteriora la calidad del agua y se hace necesario el tratamiento para mejorar la calidad. Para el año 2010, se estimó que existían alrededor de 15,000 conexiones, de las cuales únicamente 12,000 estaban debidamente registradas, es decir, que existían alrededor de un 20% de conexiones ilegales. Asimismo, es importante mencionar no se usan los medidores domiciliarios y se aplicaba una tarifa por servicio de Q12/mes (Mérida, 2010, lo cual no permiten recuperar ni siquiera los costos de operación y mantenimiento de los sistemas.

En cuanto al uso del agua para riego, se estima que existen 17,510 ha aproximadamente con cultivos que deben ser regados. El riego en la zona cañera de Guatemala es una actividad muy importante, se desarrolla junto con la zafra en el período seco, del 15 de noviembre al 15 de mayo. La actividad del riego se incrementa en la dirección al mar, debido al aumento del déficit hídrico (CENGICAÑA, 2012). Es por esto, que dentro del contexto de la Agroindustria Azucarera de Guatemala (AIA), un uso que se le da a la cosecha de agua de lluvia, es la recarga de acuíferos a través de acequias y pozos de infiltración, principalmente en la parte alta de la zona cañera.



Uso Actual (2,013) Subcuenca Cristóbal	
	Ceniza volcánica
	Lecho del río
	Cultivo forestal
	Nacimiento
	Pozo
	Reservorio
	Bosque natural
	Pasto cultivado
	Caña de azúcar
	Café
	Centro poblado
	Río Aguna
	Río Cristobal
	Río Pantaleon
	Desvíos

Proyecto: Usos y Usuarios del agua Subcuenca Cristóbal  
 Arreglo: Alma Santos y Juan Santos  
 Fecha: Diciembre, 2013  
 CGS-Datum WGS84  
 Shape: MAGA 2010  
 Hill: MAGA 2010

Figura 56: Usos y usuarios del agua, Cuenca del Río Cristóbal

Otras formas que la Agrindustria azucarera ha utilizado para almacenar agua es mediante reservorios (ver figura 56), los cuales captan la mayor cantidad de agua que pueden almacenar de los ríos y otra parte de las precipitaciones para utilizar esta agua en época de estiaje.

En la figura 56, se observan algunos desvíos o trasvaces de ríos dentro de la cuenca del río Cristóbal, son utilizados en su mayoría para fines de riego. Además en toda la zona baja de la Cuenca, se encuentra concentrada la producción de caña de azúcar, por lo que también se observa una gran cantidad de reservorios de agua. En la parte media de la cuenca se encuentran algunos pozos, posiblemente se trate del aprovechamiento del agua subterránea para, los cultivos y consumo humano.

## **B. Establecer la información necesaria para generar una base de datos sobre los usos y usuarios del agua de la cuenca del río Cristóbal.**

### **a. Elementos necesarios para la caracterización de la oferta hídrica**

Según la URL, 2005, se debe considerar el agua generada por condiciones naturales y limitada únicamente por aspectos físicos naturales, como son las condiciones meteorológicas, la topografía, el tipo de suelo y la geología. Además la oferta hídrica neta o disponibilidad neta estará afectada por el caudal ecológico y las limitaciones que se producen por la intervención humana, como la reducción de la disponibilidad por contaminación o mala utilización. También considera que el excedente disponible u oferta excedente, como la oferta hídrica neta menos el consumo de los otros usos domésticos:

Debido a que no se cuenta con estadísticas actualizadas sobre los diferentes usos que se le da al recurso, se debe recurrir a estimaciones de los usos más importantes del agua: agua potable y saneamiento, agricultura, energía, industria, pesca, turismo y otros (URL, 2005). En el siguiente cuadro se muestra la información necesaria para describir los usos y usuarios del agua de la cuenca del Río Cristóbal.

Cuadro 44: indicadores del recurso hídrico

Tipo de indicador	Nombre del indicador	Descripción
<b>Presión</b>	Escasez de agua	Relación porcentual entre la demanda de los diferentes usos del agua y la oferta hídrica neta
	Demanda doméstica del agua	Volumen de agua que consume la población urbana y rural para uso doméstico
	Demanda industrial de agua	Volumen de agua utilizado por la industria
<b>Estado</b>	Oferta hídrica bruta per cápita	Disponibilidad de agua por habitante
	Volumen disponible de agua	Oferta hídrica disponible en la Cuenca
	Tratamiento de agua	Porcentaje tratado de las descargas domésticas producidas
<b>Impacto</b>	Morbilidad	Número de casos de enfermedades de origen hídrico que se presentan por cada mil habitantes
	Mortalidad	Número de casos con víctimas mortales de enfermedades de origen hídrico que se presentan por cada diez mil habitantes
	Mortalidad infantil	Número de niños menores de cinco años que han fallecido a causa de enfermedades de origen hídrico por año
	Contaminación industrial	Volumen de descargas industriales de DBO (demanda bioquímica de oxígeno) por m <sup>3</sup> descargado por la industria
<b>Respuestas</b>	Protección zonas de recarga	Grado de protección de zonas de recarga hídrica
	Zona protegida o segura	Relación porcentual del número de hectáreas que se encuentran en áreas protegidas en zonas de recarga hídrica y el área total de recarga hídrica en hectáreas
	Zona en riesgo	Relación porcentual del número de hectáreas con cobertura forestal fuera de las zonas de área protegida per en zonas de recarga hídrica y el área total de recarga hídrica en hectáreas.
	Zona de alto riesgo	Relación porcentual del número de hectáreas de otros usos en zonas de recarga hídrica y el área total de recarga hídrica en hectáreas
	Zona urbanizada o pérdida	Relación porcentual del número de hectáreas urbanizadas en zonas de recarga hídrica y el área total de recarga hídrica en hectáreas
	Cobertura agua	Porcentaje de la población con servicio de agua

potable	potable
Urbana	Porcentaje de la población urbanas que tienen servicio de agua entubada y la población urbana total
Rural	Relación entre los pobladores del área de una región que tiene servicio de agua entubada y la población rural total
Cobertura saneamiento	Porcentaje de la población que tiene servicio de saneamiento
Urbano	Relación entre la población rural que tiene servicio de saneamiento y el total de la población rural
Rural	Relación entre la población rural que tiene servicio de saneamiento y el total de la población rural
Denuncias de agua	Relación de las denuncias en temas relacionados con el recurso hídrico y el total de denuncias ambientales en el ministerio Público.

Fuente: adoptado de URL, 2005

### **3.2.6 Conclusiones**

1. Dentro de la Cuenca del río Cristóbal se encuentran como usuarios mayoritarios del recurso hídrico, el cultivo de caña de azúcar, ubicado en la parte baja de cuenca, abarcando aproximadamente unas 17,510.70 hectáreas y dos centros poblados, con una población aproximada de 35829 y 14223 habitantes respectivamente.
2. Basados en la información generada por la URL, 2005, son 4 indicadores necesarios para describir los usos y usuarios del agua de la cuenca del Río Cristóbal, siendo estos los siguientes: presión, estado, impacto y respuesta. Estos contemplan información sobre demanda, oferta, contaminación, saneamiento, etc.,

### **3.2.7 Recomendaciones**

1. Debido a que no se cuenta con estadísticas actualizadas sobre los diferentes usos que se le dan al recurso, será necesario recurrir a estimaciones de datos sobre los usos más importantes y complementar la información con encuestas a los usuarios mayoritarios.
2. Verificar época y uso de los pozos y los vasos de almacenamiento de agua, dentro de lo cuenca del río Cristóbal
3. Coordinar con usuarios mayoritarios del agua de la cuenca del río Cristóbal, para conformar un grupo incluyente, que permita impulsar acciones encaminadas al manejo integrado del recurso hídrico

### 3.2.8 Bibliografía

1. Estrada, C; Hernández, E; Guzmán, G; García, A. 2013. Planificación integrada en la cuenca del río Cristóbal, Chimaltenango y Escuintla. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 120 p.
2. CENGICAÑA (Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar, GT). 2012. El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala. Guatemala. 512 p.
3. Mena, R. 2013. Caracterización del sistema de distribución de agua potable del casco urbano del municipio de Santa Lucía Cotzumalguapa. Documento de Graduación. Guatemala, Universidad Rafael Landívar. 67 p.
4. PREPAC (Plan Regional de Pesca y Agricultura Continental, GT). 2005. Inventario de cuerpos de agua continentales de Guatemala, con énfasis en la pesca y agricultura. Guatemala. 878 p.
5. SEGEPLAN (Secretaría General de Planificación, GT). 2011. Planificación y ordenamiento territorial, plan de desarrollo del municipio de Santa Lucía Cotzumalguapa (en línea). Guatemala. Consultado 17 feb 2013. Descargado en <http://www.segeplan.gob.gt/>
6. URL (Universidad Rafael Landívar, GT). 2005. Situación del recurso hídrico en Guatemala. Guatemala, FCAA. 67 p.

### 3.3 APÉNDICES

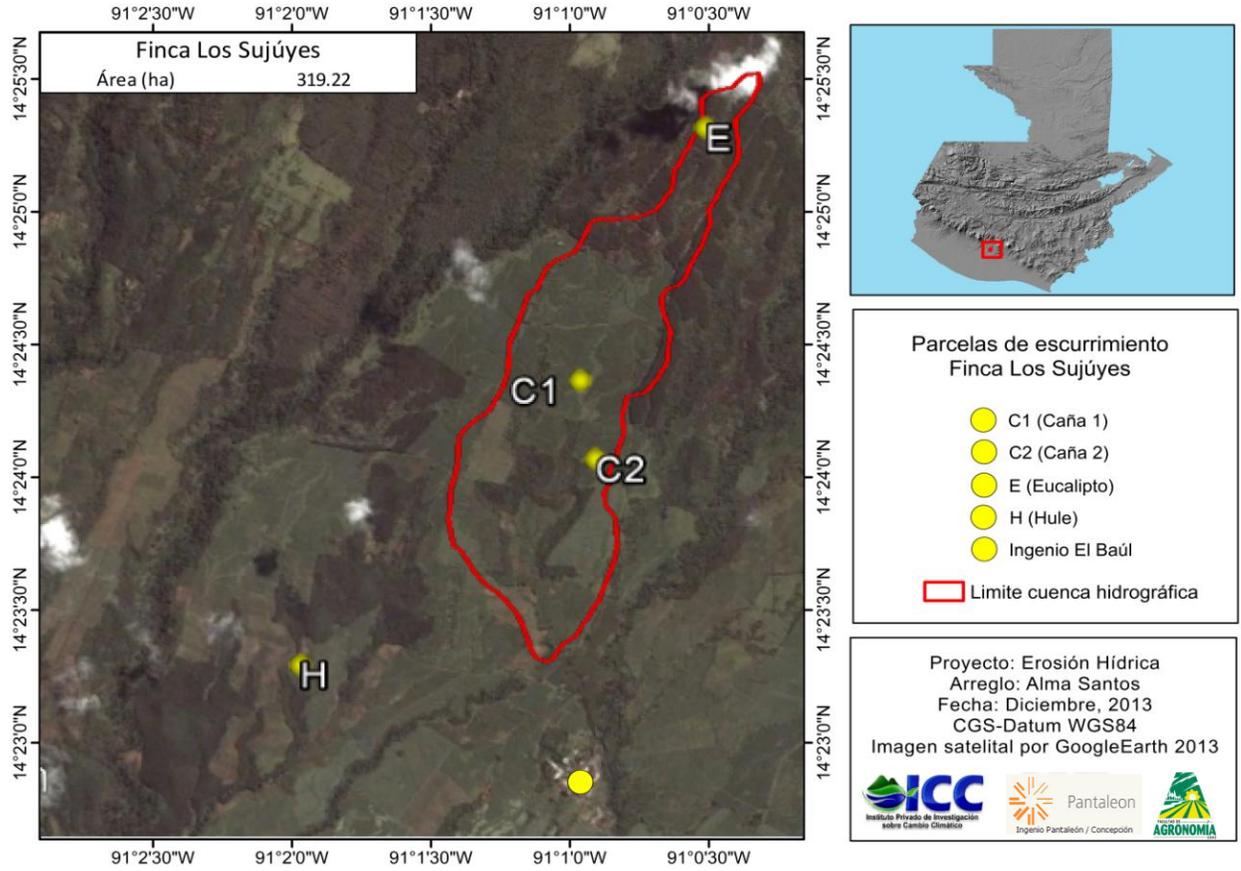


Figura 57A: Mapa de ubicación y distribución espacial de las parcelas de escurrimiento