

UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS
LICENCIATURA EN CIENCIAS AGRÍCOLAS CON ÉNFASIS EN CULTIVOS TROPICALES

ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA A TRAVÉS DE MODELACIÓN MEDIANTE
UN SIG, EN LA ZONA CAÑERA DE LA VERTIENTE DEL PACÍFICO DE GUATEMALA
TESIS DE GRADO

JUAN ANDRÉS NELSON RUÍZ
CARNET 22334-09

ESCUINTLA, OCTUBRE DE 2015
SEDE REGIONAL DE ESCUINTLA

UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS
LICENCIATURA EN CIENCIAS AGRÍCOLAS CON ÉNFASIS EN CULTIVOS TROPICALES

ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA A TRAVÉS DE MODELACIÓN MEDIANTE
UN SIG, EN LA ZONA CAÑERA DE LA VERTIENTE DEL PACÍFICO DE GUATEMALA
TESIS DE GRADO

TRABAJO PRESENTADO AL CONSEJO DE LA FACULTAD DE
CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS

POR
JUAN ANDRÉS NELSON RUÍZ

PREVIO A CONFERÍRSELE
EL TÍTULO DE INGENIERO AGRÓNOMO CON ÉNFASIS EN CULTIVOS TROPICALES EN EL GRADO
ACADÉMICO DE LICENCIADO

ESCUINTLA, OCTUBRE DE 2015
SEDE REGIONAL DE ESCUINTLA

AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR

RECTOR: P. EDUARDO VALDES BARRIA, S. J.
VICERRECTORA ACADÉMICA: DRA. MARTA LUCRECIA MÉNDEZ GONZÁLEZ DE PENEDO
VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN: ING. JOSÉ JUVENTINO GÁLVEZ RUANO
VICERRECTOR DE INTEGRACIÓN UNIVERSITARIA: P. JULIO ENRIQUE MOREIRA CHAVARRÍA, S. J.
VICERRECTOR ADMINISTRATIVO: LIC. ARIEL RIVERA IRÍAS
SECRETARIA GENERAL: LIC. FABIOLA DE LA LUZ PADILLA BELTRANENA DE LORENZANA

AUTORIDADES DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS

DECANO: DR. ADOLFO OTTONIEL MONTERROSO RIVAS
VICEDECANA: LIC. ANNA CRISTINA BAILEY HERNÁNDEZ
SECRETARIA: ING. REGINA CASTAÑEDA FUENTES
DIRECTOR DE CARRERA: MGTR. LUIS MOISÉS PEÑATE MUNGUÍA

NOMBRE DEL ASESOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

MGTR. OSCAR MANUEL OSORIO TELETOR

TERNA QUE PRACTICÓ LA EVALUACIÓN

MGTR. ERBERTO RAÚL ALFARO ORTIZ
MGTR. LUIS AMÉRICO MÁRQUEZ HERNÁNDEZ
ING. MANUEL RODRIGO SALAZAR RECINOS

Guatemala, 16 de septiembre de 2015.

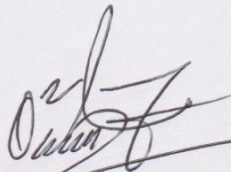
Honorables Miembros del Consejo
Comisión de Trabajos de Graduación
Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas
Universidad Rafael Landívar
Campus Central

Honorables Miembros:

Por este medio hago constar que he procedido a revisar el trabajo de tesis del estudiante: **Juan Andrés Nelson Ruiz**, carné No. **22334-09**, en la ejecución de su trabajo de tesis titulado:

“ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA A TRAVEZ DE MODELACION MEDIANTE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA UTILIZANDO LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO (USLE), EN LA ZONA CAÑERA DE LA VERTIENTE DEL PACIFICO DE GUATEMALA.” el cual considero cumple con los requisitos establecidos por la facultad de Ciencias Agrícolas y Ambientales, por lo que sugiero continúe el trámite para su aprobación final y publicación.

Atentamente:



Ing. Agr. MSc. Oscar Osorio Teletor
Código URL 5260

Orden de Impresión

De acuerdo a la aprobación de la Evaluación del Trabajo de Graduación en la variante Tesis de Grado del estudiante JUAN ANDRÉS NELSON RUÍZ, Carnet 22334-09 en la carrera LICENCIATURA EN CIENCIAS AGRÍCOLAS CON ÉNFASIS EN CULTIVOS TROPICALES, de la Sede de Escuintla, que consta en el Acta No. 06120-2015 de fecha 28 de septiembre de 2015, se autoriza la impresión digital del trabajo titulado:

ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA A TRAVÉS DE MODELACIÓN MEDIANTE UN SIG, EN LA ZONA CAÑERA DE LA VERTIENTE DEL PACÍFICO DE GUATEMALA

Previo a conferírsele el título de INGENIERO AGRÓNOMO CON ÉNFASIS EN CULTIVOS TROPICALES en el grado académico de LICENCIADO.

Dado en la ciudad de Guatemala de la Asunción, al día 1 del mes de octubre del año 2015.


ING. REGINA CASTANEDA FUENTES, SECRETARÍA
CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS
Universidad Rafael Landívar



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por brindarme vida, sabiduría y entendimiento para poder superarme, también a las personas e instituciones que confiaron en mí durante el desarrollo de esta investigación, especialmente a:

- A mis padres por ser tan importantes en mi vida, por su apoyo en todo momento, por ser un ejemplo de principios y valores.
- A la universidad Rafael Landívar, Facultad de Ciencias Agrícolas y Ambientales por fortalecer mis capacidades como persona.
- Al Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático ICC por permitirme realizar mi trabajo de graduación en tan prestigiosa institución.
- Al equipo de trabajo del ICC, Ing. Luis Reyes, Dmo. Gonzalo Lopez, Phd. Alex Guerra, Inga. Alma Santos, Dmo. Brayan Cujcuj, Lic. Sergio Gil, Ing. Elmer Orrego, por su apoyo en la finalización de mi formación como profesional.
- A mis asesores Ing. Oscar Osorio, Ing. Luis Reyes e Inga. Alma Santos, por su apoyo y confianza en la elaboración de este documento.
- A mis catedráticos de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Ambientales, Sede Escuintla por compartir sus conocimientos.
- A mis amigos y compañeros de estudio, Jose Gilberto, Luis Enrique, Brayan, Gonzalo, Elmer, Cindy, Bryan, Erick, William, Hector (+). Por su amistad. Espero se mantenga a través del tiempo.

DEDICATORIA

A:

Dios: Por permitirme llegar a este momento, tan especial en la vida y brindarme tus bendiciones durante toda mi vida.

Padres: Erick Stuardo y Gilda Antonieta les agradezco de todo corazón el apoyo que siempre me han brindado y por sus sabias enseñanzas, los amo.

Hermanos: Barbará, Natalia y Esteban por su apoyo y motivación, fundamental en cada etapa de mi formación. Que este triunfo sea un ejemplo para ustedes, los amo.

Abuelos: Luis Nelson, Olga Adrover (Q.E.P.D), Mario Ruiz y Odilia Tejeda por criarme en un hogar de principios y valores.

Amigos (as): Por el valor de su amistad sincera y desinteresada.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	2
2.1 EROSIÓN DEL SUELO	2
2.1.1 Agentes erosivos.....	3
2.1.2 Erosión hídrica	4
2.1.3 Erosión por escurrimiento	10
2.1.4 Erosión eólica.....	11
2.2 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA	11
2.2.1 Métodos cualitativos.....	11
2.2.2 Métodos cuantitativos	13
2.3 ANTECEDENTES	28
III. JUSTIFICACIÓN	29
3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	29
3.2 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	30
IV. OBJETIVOS.....	31
V. MATERIALES Y METODOS.....	32
VI. RESULTADOS Y DISCUSION	36
VII. CONCLUSIONES	49
VIII.RECOMENDACIONES.....	50
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	51
X. ANEXOS.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
FIGURA 1: EROSIÓN HÍDRICA.....	6
FIGURA 2: EROSIÓN PLUVIAL.....	8
FIGURA 3: NOMOGRAMA PARA DETERMINAR EL FACTOR K.....	25
FIGURA 4: ESTIMACIÓN DEL FACTOR K DE EUPS-USLE.....	36
FIGURA 5: ESTIMACIÓN DEL FACTOR LS DE EUPS-USLE.....	37
FIGURA 6: ESTIMACIÓN DEL FACTOR R DE EUPS-USLE.....	39

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
CUADRO 1. DIMENSIONALES DE LOS FACTORES DE USLE	22
CUADRO 2. CÓDIGO DE ESTRUCTURA PARA DEFINIR EL VALOR DE K	24
CUADRO 3. CÓDIGOS DE PERMEABILIDAD DEL SUELO PARA DEFINIR EL VALOR K.....	24
CUADRO 4. ESTIMACIÓN DEL ÁREA SEGÚN NIVEL DE EROSIÓN POR CUENCA EUPS-USLE	43
CUADRO 5. CANTIDAD POTENCIAL DE PÉRDIDA DE SUELO POR CUENCA EUPS-USLE.....	44
CUADRO 6. ESTIMACIÓN DEL ÁREA SEGÚN NIVEL DE EROSIÓN POR MUNICIPIO EUPS.....	45
CUADRO 7. ESTIMACIÓN ÁREA SEGÚN NIVEL DE EROSIÓN POR CUENCA Y MUNICIPIO EUPS....	46
CUADRO 8. PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL POR ESTACIÓN METEOROLÓGICA.	54

ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA MEDIANTE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA UTILIZANDO LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO (EUPS), EN LA ZONA CAÑERA DE LA VERTIENTE DEL PACIFICO DE GUATEMALA

RESUMEN

El objetivo del estudio fue estimar la erosión hídrica mediante un sistema de información geográfica utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS), en la zona cañera de la vertiente del Pacífico de Guatemala e identificar las zonas vulnerables a erosión. Se trabajó utilizando como base el uso de suelo, caña de azúcar del año 2008. Esta estimación se realizó recopilando y generando información de los diferentes factores que intervienen en el proceso de erosión y la EUPS. Como punto de partida se empleo información espacial en formato digital de diversas fuentes (ICC, GENGICAÑA, MAGA). Los resultados muestran que según la clasificación de FAO (1979); 41,996 hectáreas son vulnerables a sufrir erosión muy fuerte, encontrándose la mayor superficie en la parte alta de la zona cañera (>300 msnm); esto debido principalmente a la topografía del área (inclinación y longitud de la pendiente) y las altas precipitaciones (intensidad, duración y frecuencia de las lluvias). Además se generó cartografía específica de la erosión hídrica a nivel de vertiente del Pacífico y mapas específicos para cuencas y municipios que cuentan con cobertura de caña de azúcar.

**ESTIMATION OF THE HYDRIC EROSION THROUGH A GEOGRAPHICAL
INFORMATION SYSTEM USING THE UNIVERSAL SOIL LOSS EQUATION (USLE),
IN THE SUGARCANE PRODUCTION AREA OF THE PACIFIC SLOPE OF
GUATEMALA**

SUMMARY

The objective of this study was to estimate the hydric erosion through a geographical information system, using the Universal Soil Loss Equation (USLE) in the sugarcane production area of the Pacific slope of Guatemala, and to identify the zones vulnerable to erosion. For the study, soil and sugarcane from the 2008 harvest was used. This estimation was carried out gathering and generating information from the different factors that intervene in the erosion process and USLE. As a starting point, digital spatial information was gathered from different sources (ICC, GENGICAÑA, MAGA). The results demonstrate that according to the FAO classification (1979), 41,996 hectares are vulnerable to a severe erosion since most part of the surface is located in the higher sugarcane production area (>300 masl). This is mainly due to the area's topography (steepness and length of the slope) and high precipitations (intensity, duration, and rain frequency). Additionally, a specific cartography of the hydric erosion at a Pacific slope level was generated, as well as specific maps for the basins and municipalities in which sugarcane is produced.

I. INTRODUCCIÓN

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 escarpada de los terrenos, la ausencia de cobertura vegetal, la condición textural o el pobre desarrollo estructural de los suelos (Nuñez Solis, 2001).

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 Tm/Ha/año), debido al proceso de erosión hídrica; siendo la Vertiente del Pacífico la más erosionada, ya que en esta se encuentra una alta producción agrícola (MARN, 2009).

Dentro de los objetivos del estudio estuvieron recopilar y analizar información generada para la zona cañera, análisis de datos para generación de los diferentes factores o variables que conforman la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo EUPS-USLE y debido a que en la actualidad se cuenta con información específica de diferentes instituciones, se recopiló y analizó dicha información y además se analizaron datos de precipitación de la Red de Estaciones Meteorológicas del Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC) y se generó el factor R (Erosividad de la lluvia $Mj/Ha*mm/hr$).

Los resultados obtenidos fueron mapas, cuadros e imágenes que muestran los diferentes niveles de erosión que presenta la zona cañera de la vertiente del pacífico según la EUPS, donde se pueden identificar las zonas más susceptibles a erosión y que deben de ser manejadas de una manera adecuada para reducir dicha erosión. En total se analizaron 282,752 hectáreas bajo cultivo de caña de azúcar y se muestra la erosión dividida en vertiente, cuenca y municipio. Esta información muestra el panorama general del estado de la erosión hídrica para el cultivo de caña de azúcar, la cual nos permite identificar las áreas que necesitan mayor atención e incluso implementación de diferentes prácticas o estructuras de conservación de suelos.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 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 (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 agro sistemas, 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. (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 zanjas 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 la energía cinética tanto del viento como del agua (FAO, 2000).

2.1.1 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 Solis, 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 Solis, 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 Solis, 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 aspersión, 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 Solis, 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 erosividad de las lluvias, que causan erosión (Núñez Solis, 2001).

2.1.2 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 (Rivera Trejo *et al.*, 2005). Esta erosión hídrica, es un proceso erosivo típico de regiones tropicales, causado por la erosividad de la lluvia, debido a las características de intensidad, duración y frecuencia asociadas a los eventos pluviométricos (Nuñez Solis, 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 escorrentía 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 (Núñez Solís, 2001).

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 1A y 1B), 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, el fósforo, entre otros (Escalante, 2005).

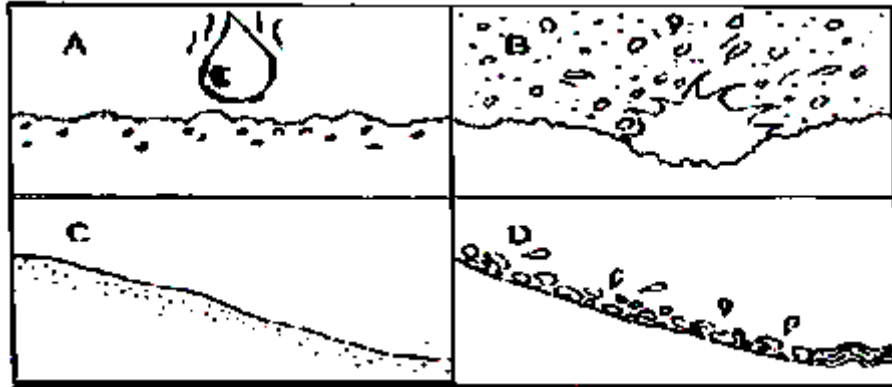


Figura 1: Erosión hídrica¹

Fuente: Núñez Solís, 2001

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 terracetas. Todos los

¹ 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.

procesos (excepto la erosión pluvial y en terracetas), 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 soliflucción, 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 2a). 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 2c). 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 Solis, 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 Solis, 2001).

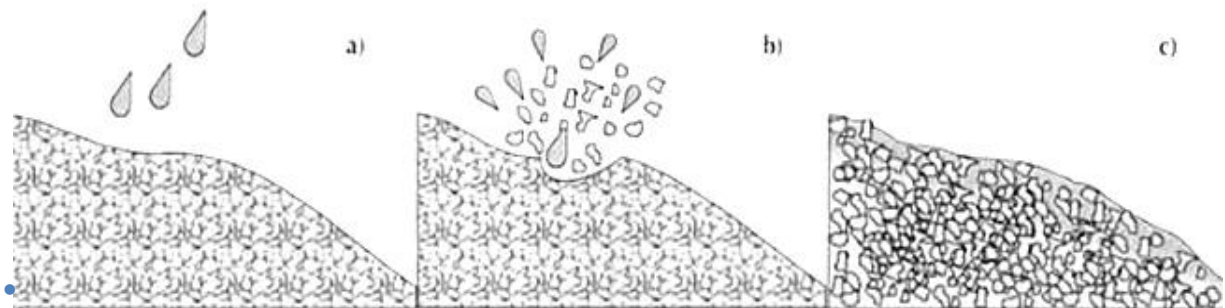


Figura 2: Erosión pluvial²

Fuente: Núñez Solis, 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

² a) Erosión pluvial, b) erosión por salpique y c) erosión laminar

el proceso que sigue normalmente al proceso de erosión en surcos, o procesos combinados de erosión en surcos y en terracetos (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 terracetos:** 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: **Soliflucción:** 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 sub superficial, a las regiones afectadas por soliflucción. **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).

2.1.3 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 Bolivar, 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).

2.1.4 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 3). 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 (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 Solis, 2001).

2.2 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.

2.2.1 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. (Rafaelli, López & Almorox, 2010).

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 & 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 & 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 & 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 & 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 & 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 micro topografías 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 & Almorox, 2010).

2.2.2 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 & 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 & 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 & Almorox, 2010).

La parcela de medición generalmente está compuesta de un área de escurrimiento con bordes y un recipiente de captación. Los bordes divisores de las parcelas, pueden ser de lámina de pycem 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 (Rafaelli, López & Almorox, 2010).

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 & Velásquez, 1998). Su tamaño más frecuente es de 44 m² (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 (Vallejos & Velásquez, 1998).

La medición o cuantificación 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 & 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 (Vallejos & Velásquez, 1998). 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 (ton/ha) (Salgüil, 1995). Según (Rafaelli, López & 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 (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).

i. 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, los arrastres 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 hidro-morfológicos 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 cuenca experimental 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 & Almorox, 2010).

ii. Mediciones volumétricas

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

La tasa de erosión se cuantifica midiendo el rebajamiento de las micro formas, 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 micro formas 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 & 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 (Taboada, 2003).

En general, todos los modelos existentes pueden relacionarse con uno 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 deposición.
- 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).

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 erosionabilidad 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:

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

Ecuación1: Ecuación universal de la pérdida de suelo

La EUPS se desarrolló como un método para predecir la pérdida promedio anual de suelo, procedente de la erosión en inter arroyuelos 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
- Estimar las pérdidas de suelo en áreas con un uso de suelo distinto del agrícola
- Obtener estimaciones de pérdida de suelo, para que los conservacionistas determinen las necesidades de conservación (Kirby & 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 deposición 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:

$$\bullet \quad A = R * K * L * S * C * P$$

- 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.

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 (Núñez Solis, 2001).

Cuadro 1. Dimensionales de los factores de USLE

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	$\frac{\text{Longitud} * \text{fuerza}}{\text{Área} * \text{longitud}}$	$\frac{\text{megajulios}}{\text{ha} * \text{mm}}$
Erosividad de las tormentas	El	$\frac{\text{Longitud} * \text{fuerza} * \text{longitud}}{\text{Área} * \text{tiempo}}$	$\frac{\text{megajulios} * \text{mm}}{\text{ha} * \text{h}}$
Pérdida de suelos	A	$\frac{\text{Masa}}{\text{tiempo} * \text{Área}}$	$\frac{\text{kg}}{\text{haporaño}}$
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	$\frac{\text{masa} * \text{área} * \text{tiempo}}{\text{Área} * \text{longitud} * \text{fuerza} * \text{long.}}$	$\frac{\text{t} * \text{ha} * \text{h}}{\text{ha} * \text{megajulios} * \text{mm}}$
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: Nuñez Solis, 2001

Análisis de los factores de la ecuación universal de la pérdida de suelos: 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 Solis, 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 (Núñez Solis, 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 3):

Cuadro 2. 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

(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 4):

Cuadro 3. 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

(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 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 3.

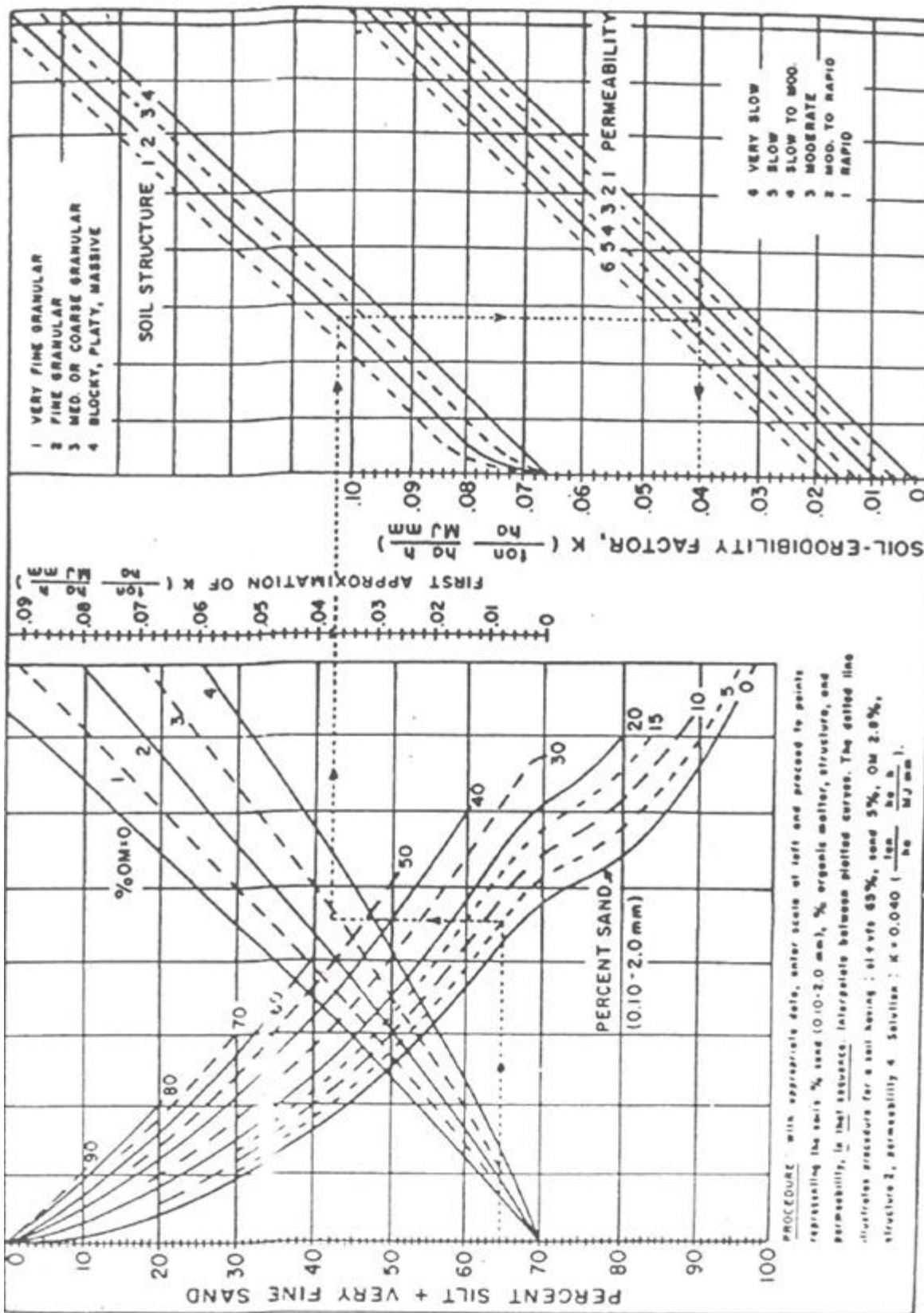


Figura 3: Nomograma para determinar el Factor K

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 EUPS se basó en una parcela modelo o normalizada, de 22.13 metros de longitud. Para definir L se usa la ecuación:

$$L = \left(\frac{x}{22.13}\right)^m$$

Ecuación 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), y las acogen en su documento (Núñez Solis, 2001). 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:

$$S = 0.065 + 0.045s + 0.0065 s^2$$

Ecuación 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. (Núñez Solis, 2001).
- **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 (Núñez Solis, 2001).

2.3 ANTECEDENTES

La agroindustria azucarera de Guatemala, están implementando prácticas de conservación de suelos, para evitar la erosión de los mismos; actualmente el Instituto Privado de Investigación sobre el Cambio Climático (ICC) ha realizado evaluaciones de estas prácticas de conservación de suelos, en las cuales se muestra la contribución en la disminución de la velocidad de la escorrentía, aumento del volumen de infiltración de agua y la disminución en la erosión de los suelos 115 t/ha/año (Orrego, 2012).

Como parte de las actividades del ICC, se desarrolló un estudio sobre la erosión hídrica en la parte alta de la zona cañera, micro cuenca Los Sujúyes, Escuintla, Guatemala; utilizando para ello la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Modificada EUPSM - MUSLE, por sus siglas en inglés- la cual se validó en campo a través de parcelas de escurrimiento. Se desarrolló este estudio de erosión de suelos en una finca azucarera de la vertiente del Pacífico, la cual es estratégica, ya que los datos sobre la erosión del suelo y los factores que la controlan, son útiles para reducir la erosión y controlar las pérdidas de nutrientes de los suelos agrícolas. Estos datos también contribuyen a evitar la contaminación de las fuentes de agua, reducir las tasas de sedimentación en cauces de ríos, canales y reducir los daños por inundación a cultivos y poblados.

III. JUSTIFICACIÓN

3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La vertiente del pacifico es una de las regiones más productivas Guatemala, esto se debe a la profundidad y riqueza de los suelos. Estos suelos están en constante degradación por diferentes factores, algunos de los cuales son de origen natural, como algunos provocados por el hombre.

La erosión hídrica es uno de los factores naturales que tienden a degradar el suelo, pero esta erosión aumenta cuando las áreas con altos porcentajes de pendiente son sometidas a usos agrícolas intensivos sin prácticas de conservación de suelos.

Por tal razón, la erosión hídrica aumenta, generando pérdidas de suelo, pérdida de área efectiva de cultivo, pérdida de nutrientes y altos costos de mantenimiento de calles debido a la alta cantidad de cárcavas generada por la escorrentía.

Como parte de las mejorías, la agroindustria azucarera está cambiando la forma de manejar sus cultivos en las zonas con pendientes altas, realizando un cambio de uso del suelo e implementando prácticas o estructuras de conservación de suelos.

Pero debido a que cada ingenio azucarero maneja de diferente manera sus cultivos y que no existe una identificación de las áreas con alto potencial a erosión de suelos, aún existen áreas que no poseen prácticas o estructuras de conservación de suelo y que necesitan la inclusión de estas prácticas para reducir las pérdidas de suelo.

3.2 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

El trabajo que se realizó, tuvo como objetivo identificar las áreas que presentan una alta probabilidad de erosión hídrica dentro de la zona cañera, debido a que este tipo de erosión es el que causa mayores pérdidas de suelo en la región y existen áreas que aun no están consideradas para la implementación de prácticas o estructuras de conservación de suelos.

Este trabajo viene a complementar las acciones que realizan los ingenios en la parte alta de la zona cañera, las cuales están siendo evaluadas por el Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático –ICC- y la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala-FAUSAC-. Los estudios realizados, evidencian que las estructuras de conservación de suelos como lo son las acequias de laderas, cultivos en curvas a nivel, entre otros, reducen la cantidad de suelo erosionado, disminuyendo las pérdidas de áreas efectivas y nutrientes del suelo.

El producto que se obtendrá, permitirá a miembros de diferentes ingenios azucareros que poseen cultivos en partes con altas pendientes, tomar decisiones en cuanto a cambio de uso del suelo o incorporación de prácticas o estructuras de conservación y así poder reducir las pérdidas de suelos en sus áreas de trabajo.

IV. OBJETIVOS

4.1 General

- Estimar la erosión hídrica mediante un sistema de información geográfica (SIG) utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS-USLE), en la zona cañera de la vertiente del Pacífico de Guatemala.

4.2 Específicos

- Recopilar información de los factores que integran la EUPS.
- Analizar información para generación de factores faltantes de EUPS.
- Generar información cartográfica de la erosión hídrica del área de estudio.

V. MATERIALES Y METODOS

5.1 AMBIENTE

El trabajo se realizó en el departamento de Sistemas de Información Geográfica (SIG), del ICC, con sede en las instalaciones del Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar (CENGICAÑA), kilometro 92.5 carretera a Santa Lucia Cotz, Escuintla.

Con el apoyo del programa de agronomía de CENGICAÑA, FAUSAC y GIS Specialist de USDA/APHIS/IS/MedflyProgram.

5.2 UNIDADES DE ANÁLISIS

El área que se analizó fue la zona cañera de la vertiente del pacífico de Guatemala 2008, debido a que se tiene acceso a información específica generada para la región.

Dentro de la información con la que se contó están:

- Información de red de estaciones meteorológicas de ICC.
- Capa vectorial del estudio semi-detallado de suelos de la zona cañera del sur de Guatemala.
- Capa vectorial de texturas de la zona cañera de Guatemala.
- Cartografía oficial (MAGA).

5.3 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La tesis que se realizó fue de tipo descriptiva, debido a que el objetivo fue sistematizar la información que se encuentra generada para la zona cañera y a partir de esta generar información referida al tema de erosión hídrica y de los factores que conforman la EUPS-USLE.

5.4 INSTRUMENTOS

Para la fase de recopilación de información, se realizaron consultas a los profesionales en sistemas de información geográfica (SIG) de ICC y de CENGICAÑA, para obtener los archivos tipo shape o raster necesarios para el cálculo de las variables que conforman la fórmula.

Además se hizo la solicitud de la información de la Red de Estaciones Meteorológicas de ICC para poder realizar el análisis de los datos y los cálculos de los factores que involucraban estos datos.

La fase de cálculo de las variables que conforman la fórmula USLE, se realizó en los programas Excel® y ArcGis 10® con sus diferentes herramientas, modificando y concatenando los datos y capas de información a manera de obtener los resultados esperados para cada factor de la ecuación.

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:

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

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.

5.5 PROCEDIMIENTO

Se realizó una consulta documental o recopilación de información de las diferentes metodologías que existen para el cálculo de los factores y se pusieron en práctica.

Para modelar la Ecuación Universal de Pérdida del Suelo (EUPS-USLE) en ArcGis 10® se calculó por separado cada uno de los factores faltantes, mediante una serie de operaciones, utilizando la aplicación Model Buidier, ésta permitió crear, editar y administrar modelos, dando como resultado capas tipo raster para cada factor.

Posteriormente se operó matemáticamente con las capas resultantes para obtener la cartografía de erosión hídrica.

Con la erosión hídrica generada para la zona cañera de la vertiente del pacifico, se realizaron clasificaciones por cuencas, para poder mostrar los resultados a los socios de una manera que ellos pueden interpretarla y utilizarla con mayor facilidad.

La escala de trabajo utilizada fue 1: 50,000 y la escala de visualización de los resultados es 1:500,000.

5.6 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Dentro los objetivos de la tesis estuvieron la generación de capas de información geográfica de factores que integran la fórmula EUPS-USLE para la región. Estas capas de información fueron necesarias para el cálculo de la erosión hídrica y además podrán ser utilizadas para otros usos dentro del ICC y del sector azucarero.

La información de erosión hídrica que se obtuvo, se presenta en capas de información geográfica, clasificada utilizando los rangos de clasificación de FAO 1979.

Además, los resultados obtenidos, fueron sometidos a discusión con los departamentos de ingeniería agrícola de algunos ingenios azucareros para verificar si la estimación de erosión hídrica obtenida, se asemeja a las condiciones de campo que ellos enfrentan.

VI. RESULTADOS Y DISCUSION

1) Informacion recopilada.

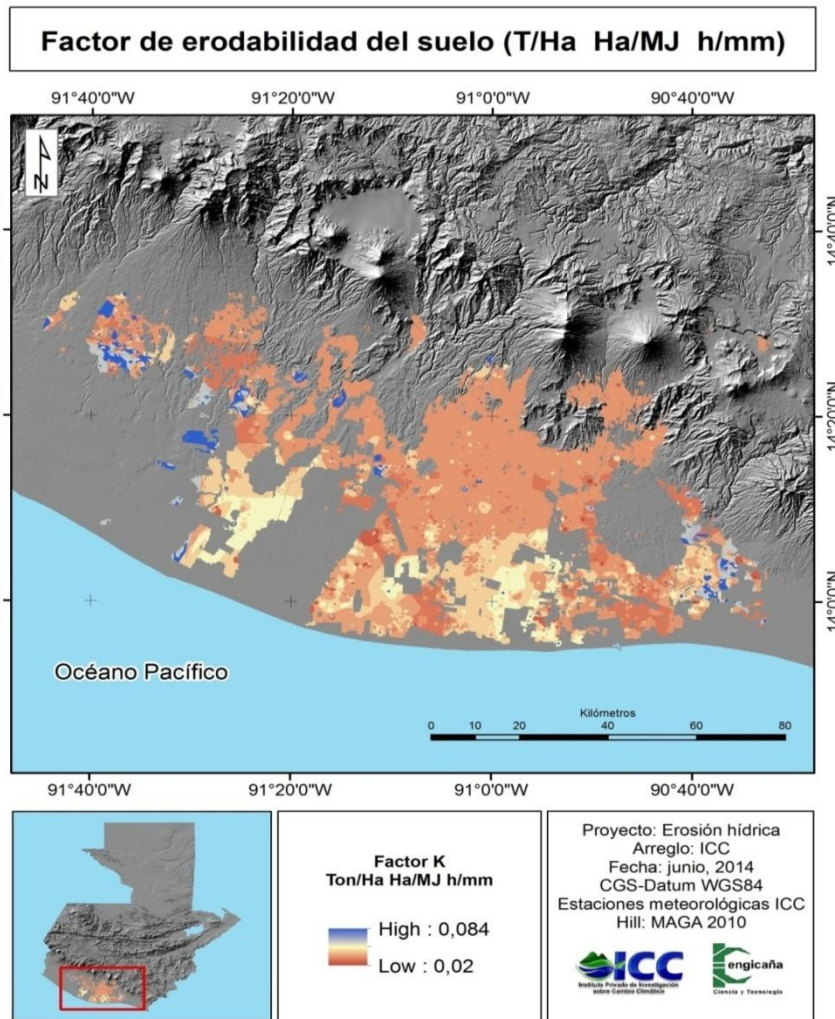


Figura 4: Estimación del factor K de EUPS-USLE.

En la figura se muestra la distribución de la erodabilidad del suelo en la zona cañera de la vertiente del pacifico, a una escala de visualización de 1:725,000, este factor muestra lo susceptible que es el suelo a sufrir procesos erosivos. Este factor se basa principalmente en la textura del suelo y el contenido de materia orgánica. Como se muestra en la imagen, el color azul indica una alta susceptibilidad de los suelos a sufrir erosión hídrica, mientras que los colores marrones indican una baja susceptibilidad a este proceso.

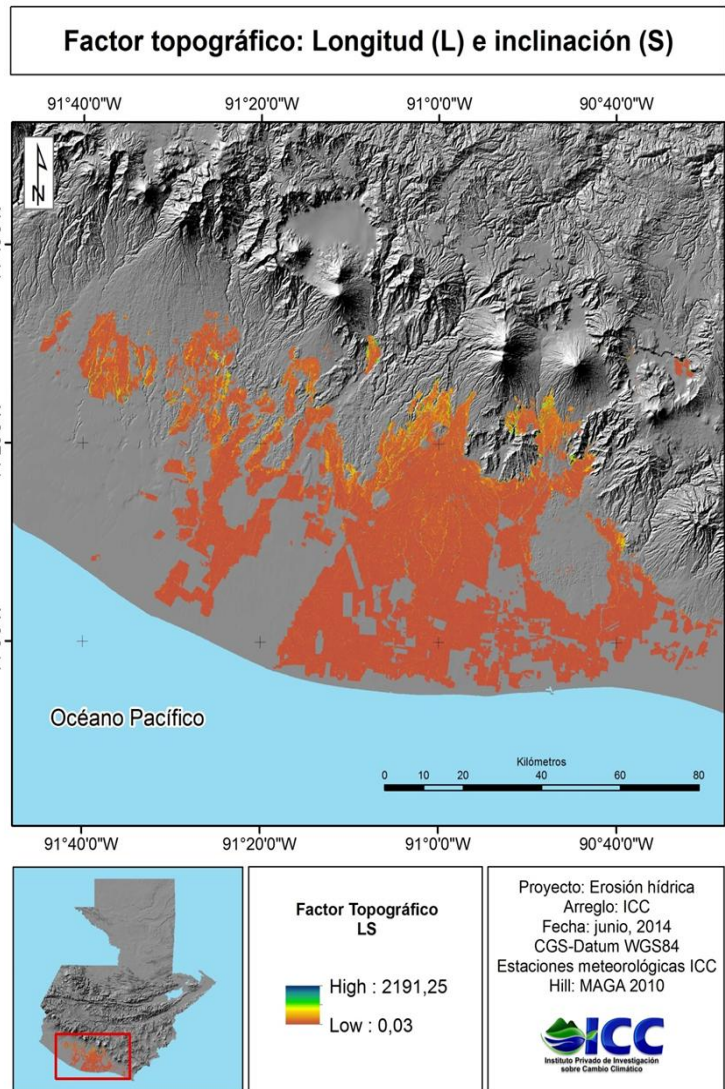


Figura 5: Estimación del factor LS de EUPS-USLE.

En la figura 5 se muestra la longitud y grado de pendiente de los terrenos de la zona cañera de la vertiente del pacifico, a una escala de visualización de 1:725,000, esta información fue obtenida a partir de el Modelo de Elevación Digital (DEM), el cual se encuentra generado para la república de Guatemala. Las pendientes en las áreas de cultivos de caña de azúcar que mas predominan son entre un 0% a un 15%. La coloración más clara en el mapa indica mayor susceptibilidad del área a sufrir erosión hídrica y la coloración obscura indica una menor susceptibilidad.

Factor de cobertura (Factor C).

Para la asignación del valor de C se utilizaron diversas fuentes, obteniendo un promedio para caña de azúcar de 0.2258. (Santos Pérez, 2014).

Factor de conservación (factor P)

Debido a que este factor representa el efecto de las prácticas de conservación de suelos; y no se cuenta con información generada para este cultivo, se asumió en el estudio que no existe ninguna practica de conservación de suelos. Lo que nos da un factor $P=1$. Esta información está actualmente siendo generada por cada uno de los ingenios azucareros, para posteriormente estar disponible e incluirse en análisis de este tipo.

2) Informacion generada

Generación de los mapas de erosión hídrica.

Para la generación de los mapas de erosión hídrica, fue necesario la multiplicación de las capas de información en el software ArcGis 10®, para posteriormente realizar diferentes procesos que permitieron mostrar la información en mapas para la vertiente del pacifico. Además fueron necesarias bases de datos de precipitación para el cálculo del factor R.

Además se realizó el análisis de la información de erosión hídrica a nivel de vertiente, a nivel de cuencas hidrográficas y a nivel de municipios, obteniendo mapas específicos para cada una de las categorías.

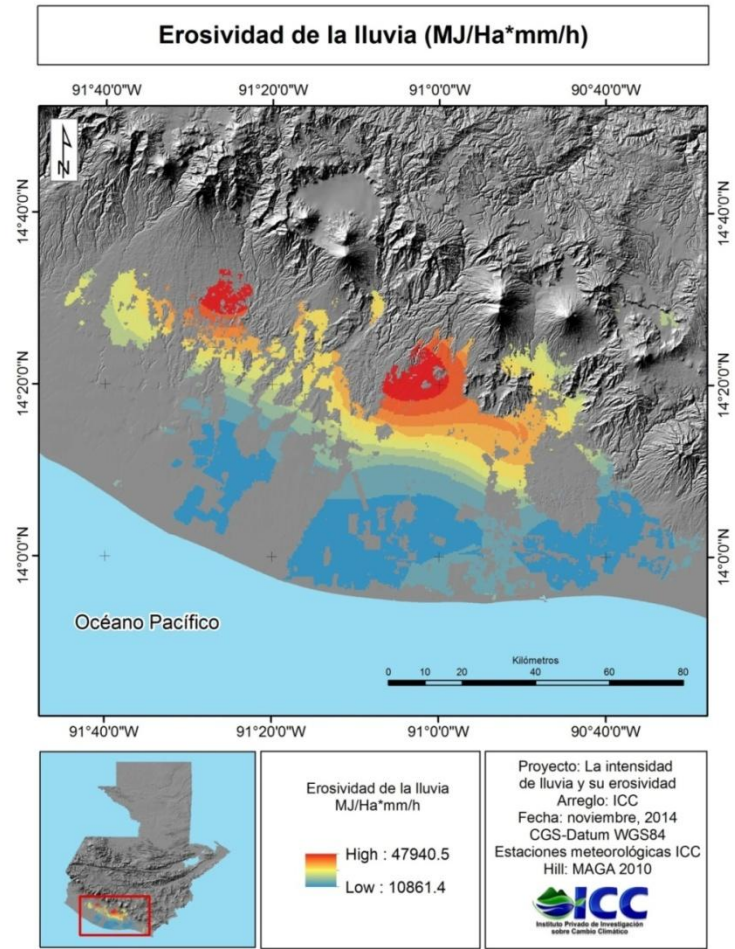


Figura 6: Estimación del factor R de EUPS-USLE.

En la figura 6 se representa la agresividad de la lluvia por sus características hidrodinámicas para la zona cañera de la vertiente del Pacífico a una escala de visualización de 1:725,000. Para el cálculo del factor R, fue necesario analizar la información de 16 estaciones meteorológicas de la Red de Estaciones Meteorológicas del ICC. Se tomaron en cuenta datos de precipitación cada 15 minutos (96 datos/día) del año 2007 al año 2013 para el cálculo. Con estos datos se pudo estimar la cantidad de lluvia por día, la duración de la lluvia y la máxima intensidad durante 30 minutos. El valor del factor R está expresado en $Mj/Ha*mm/h$. Los colores rojizos indican una alta agresividad de la lluvia en la zona y las coloraciones azules y celestes indican una baja agresividad de la lluvia, esto nos indica que las partes donde existen precipitaciones más altas e intensidades más altas, tienen un riesgo más alto a sufrir erosión.

Para el cálculo de la erosión hídrica, se realizó una multiplicación de archivos raster (imagen de mapa de bits) de cada uno de los factores que integran la EUPS-USLE. Este proceso se realizó mediante el software ArcGis10®, con la herramienta álgebra de mapas®. Posteriormente el raster (imagen de mapa de bits) resultante se convirtió a Shapefile (formato de representación vectorial). Con los shapefiles generados, se realizaron diferentes intersecciones para obtener el análisis por vertiente, por cuenca hidrográfica y por municipio.

Según USLE, el área bajo cobertura de caña de azúcar presenta un 38% del área con un nivel de erosión fuerte, seguida de erosión nula a leve con 38%, muy fuerte con 15% y moderada 9%. Las mayores tasas de erosión se encuentran en la parte media-alta de la zona cañera (200-800 msnm), esto principalmente a las precipitaciones que se registran en estas áreas y al tipo de suelo presente, haciendo de estas zonas las más vulnerables a ser erosionadas y por lo que deberían implementarse prácticas y/o estructuras de conservación de suelos.

En la figura 7 se muestra la estimación de la erosión hídrica en la zona cañera de la vertiente del pacífico de Guatemala. Esta zona presenta una tasa promedio de erosión de 84 toneladas por hectárea por año, lo cual se considera una erosión fuerte.

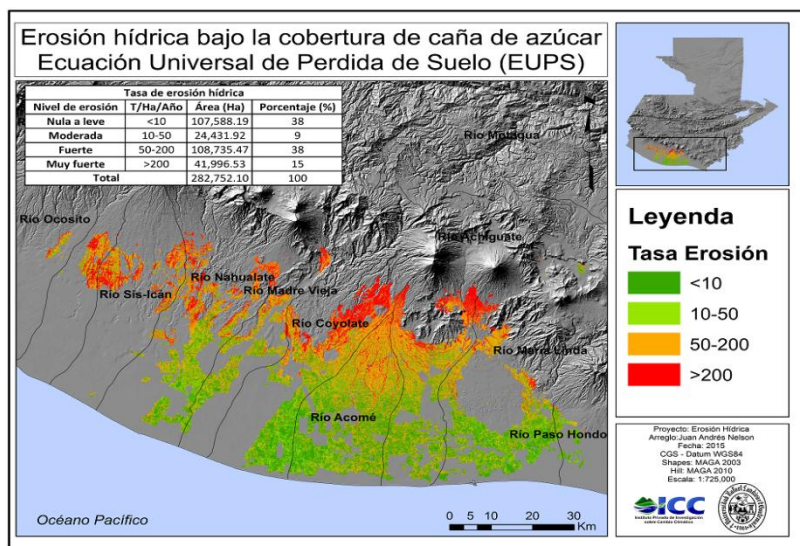


Figura 7: Estimación de la erosión hídrica bajo cobertura de caña de azúcar EUPS-USLE de la zona cañera de la vertiente del pacífico de Guatemala.

Según USLE, el área bajo cobertura de caña de azúcar en la cuenca del río Acome presenta un 46% del área con un nivel de erosión nula a leve, seguida de erosión fuerte con 41%, moderada con 8% y muy fuerte 5%. Las mayores tasas de erosión se encuentran en la parte media-alta de la cuenca (200-800 msnm), esto principalmente a las precipitaciones que se registran en estas áreas y al tipo de suelo presente, haciendo de estas zonas las más vulnerables a ser erosionadas y por lo que deben implementarse prácticas y/o estructuras de conservación de suelos. Esta cuenca presenta una tasa promedio de erosión de 68 toneladas por hectárea por año, lo cual se considera una erosión fuerte, como se muestra en la figura 8.

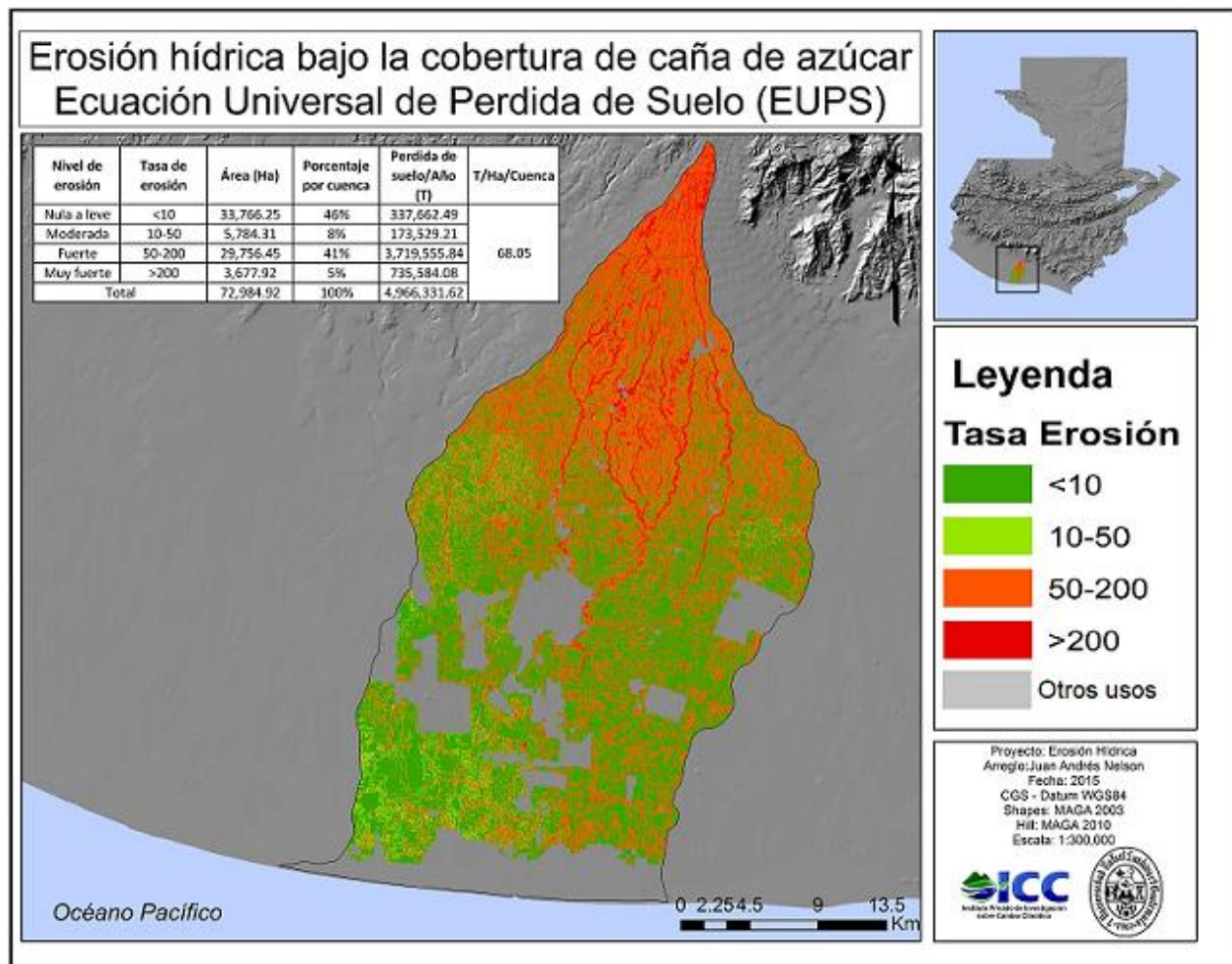


Figura 8: Estimación de la erosión hídrica bajo cobertura de caña de azúcar, EUPS-USLE cuenca río Acomé.

Según USLE, el área bajo cobertura de caña de azúcar en el municipio de La Gomera Escuintla, presenta un 60% del área con un nivel de erosión nula a leve, seguida de erosión fuerte con 25%, moderada con 13% y muy fuerte 2%. Las mayores tasas de erosión se encuentran en la parte alta del municipio (50-100 msnm), esto principalmente a las precipitaciones que se registran en estas áreas y al tipo de suelo presente, haciendo de estas zonas las más vulnerables a ser erosionadas y por lo que deben implementarse prácticas y/o estructuras de conservación de suelos. Este municipio presenta una tasa promedio de erosión de 45 toneladas por hectárea por año, lo cual se considera una erosión moderada, como se muestra en la figura 9.

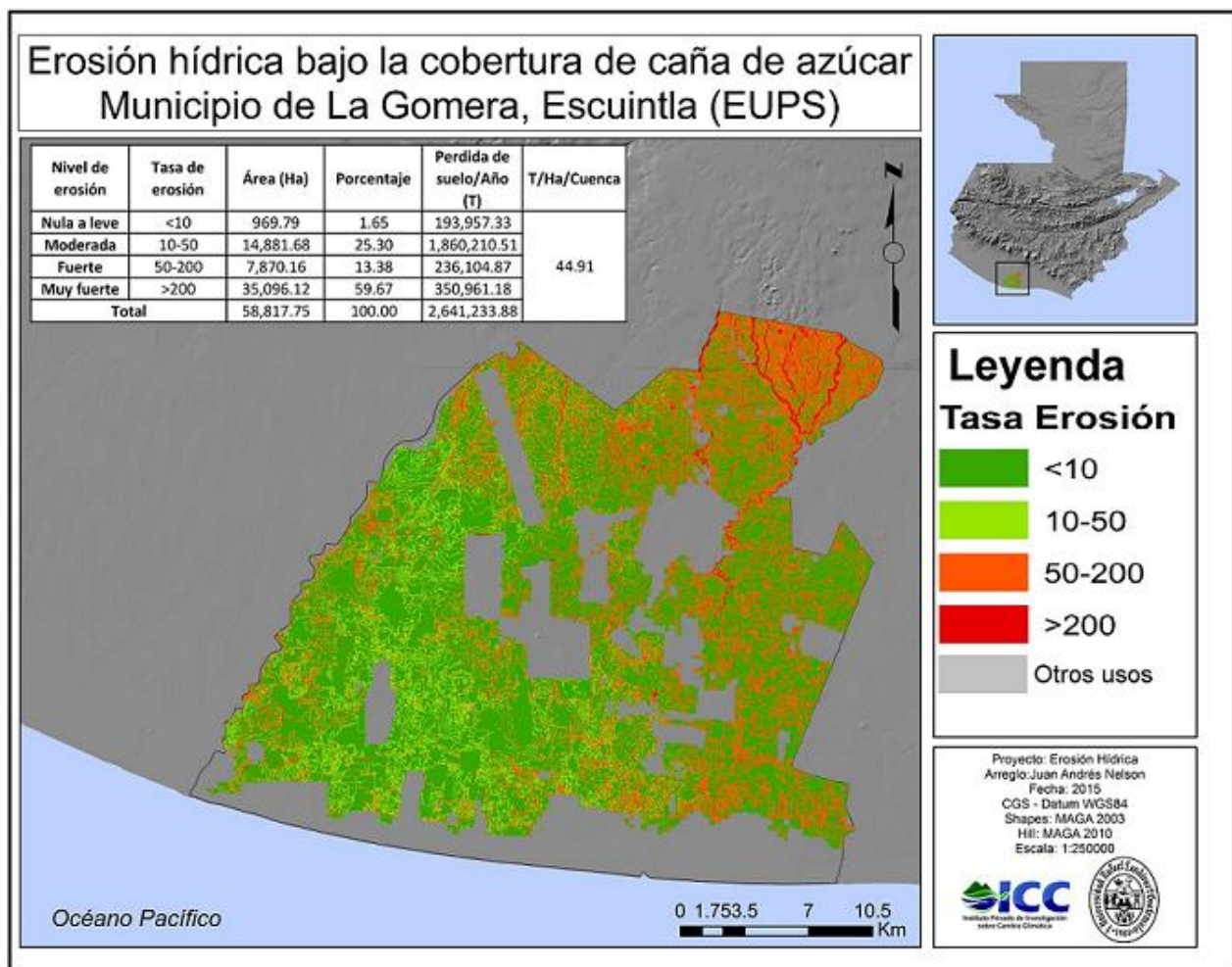


Figura 9: Estimación de la erosión hídrica bajo cobertura de caña de azúcar, EUPS-USLE municipio de La Gomera, Escuintla.

Cuadro 4. Estimación del área según nivel de erosión por cuenca EUPS-USLE

Cuenca/Nivel Ero	Nula a leve	Moderada	Fuerte	Muy fuerte	Total (Ha)
Río Achiguate	11,511.94	1,510.54	15,953.67	7,526.89	36,503.05
Río Acomé	33,766.25	5,784.31	29,756.45	3,677.92	72,984.92
Río Coyolate	18,298.75	5,220.72	16,929.34	11,415.13	51,863.93
Río Madre Vieja	2,836.70	615.5	3,955.54	1,430.97	8,838.71
Río María Linda	20,837.42	5,206.13	14,043.49	2,807.28	42,894.33
Río Nahualate	14,317.57	4,267.47	17,411.16	7,163.99	43,160.19
Río Ocosito	304.44	100.9	704.91	318.68	1,428.94
Río Paso Hondo	3,277.42	871.79	1,084.50	68.5	5,302.21
Río Samalá	732.21	328.91	2,640.56	2,471.52	6,173.19
Río Sis-Icán	1,705.49	525.66	6,255.84	5,115.65	13,602.64
Total general	107,588.19	24,431.92	108,735.47	41,996.53	282,752.10
Porcentaje	38%	9%	38%	15%	100%

El cuadro 4 muestra el área de la vertiente del Pacífico dividida en cuencas y niveles de erosión, se muestra el área que posee cada una de las cuencas con los diferentes niveles de erosión. Se puede observar que las cuencas con mayor cantidad de cultivo de caña son Acome, Coyolate y Nahualate con 72,984, 51,863 y 43,160 hectáreas respectivamente; para las cuales el nivel de erosión predominante es el de nula o leve con un 40 % del área. Para el caso de las cuencas Samala y Sis-Ican que poseen 6,173 y 13,602 hectáreas respectivamente con un 38% del área en un nivel de erosión muy fuerte. Esta información nos indica que cada cuenca tiene una dinámica en cuanto a erosión hídrica particular, por lo que debe ser analizada de manera independiente para poder reducir o controlar la pérdida de suelo.

Cuadro 5. Cantidad potencial de pérdida de suelo por cuenca EUPS-USLE

Cuenca	Área (Ha)	Pérdida de suelo/Año (Ton)	Ton/Ha/Año
Río Achiguate	36,503.05	3,660,022.69	100.27
Río Acomé	72,984.92	4,966,331.62	68.05
Río Coyolate	51,863.93	4,738,801.78	91.37
Río Madre Vieja	8,838.71	827,468.39	93.62
Río María Linda	42,894.33	2,681,451.41	62.51
Río Nahualate	43,160.19	3,880,392.25	89.91
Río Ocosito	1,428.94	157,922.10	110.52
Río Paso Hondo	5,302.21	208,191.02	39.26
Río Samalá	6,173.19	841,562.86	136.33
Río Sis-Icán	13,602.64	1,837,934.71	135.12
Total general	282,752.10	23,800,078.82	84.17

El cuadro 5 nos muestra la cantidad de área de cultivo de caña de azúcar que posee cada una de las cuencas, la cantidad de suelo que podría perder cada una de las cuencas por año y un promedio de tasa de erosión anual por cuenca. Como se puede observar, la cantidad de área de cultivo no está directamente relacionada con el promedio anual de pérdida de suelo, ya que cada una de las cuencas posee una dinámica diferente, la cual afecta el comportamiento de la erosión dentro de la cuenca. Por ejemplo la cuenca con mayor cantidad de área de caña de azúcar es Acomé con 72,984 hectáreas y un promedio de erosión de 68.05 Ton/Ha/Año mientras que la cuenca del río Samalá con 6,173 hectáreas de cultivo de caña de azúcar posee un promedio de erosión de 136.33 Ton/Ha/Año; lo que nos indica que la cantidad de suelo por hectárea que se pierde en la cuenca del río Samalá a la de la cuenca del río Acomé.

Cuadro 6. Estimación del área según nivel de erosión por municipio EUPS.

No.	Municipio/Nivel de Erosión	Nula a leve	Moderada	Fuerte	Muy fuerte	Total Ha
1	La Gomera	35,096.12	7,870.16	14,881.68	969.79	58,817.75
2	Santa Lucía Cotzumalguapa	6,179.14	1,374.58	16,345.36	9,681.79	33,580.86
3	La Democracia	11,702.06	1,438.92	11,770.02	1,385.61	26,296.61
4	Tiquisate	12,147.24	3,373.28	8,492.57	805.73	24,818.82
5	Masagua	12,733.49	2,671.42	7,384.78	492.79	23,282.48
6	Escuintla	2,396.36	764.13	9,281.38	6,234.10	18,675.97
7	Patulul	1,426.68	565.51	4,953.13	2,753.60	9,698.93
8	Taxisco	6,023.04	1,747.23	1,802.33	120.28	9,692.89
9	Siquinalá	442.43	93.17	5,053.04	2,990.06	8,578.70
10	San José Santo Domingo	5,434.93	465.92	2,591.70	71.31	8,563.87
11	Suchitepéquez	1,813.82	420.10	3,454.27	1,406.92	7,095.11
12	San José El Idolo	845.65	334.06	2,994.87	2,199.75	6,374.33
13	Guanagazapa	2,752.68	953.73	2,043.85	467.38	6,217.65
14	San Andrés Villa Seca	630.88	316.15	2,514.11	2,537.94	5,999.08
15	Río Bravo	1,505.89	457.36	2,744.60	1,275.28	5,983.13
16	Nueva Concepción	2,412.90	449.10	2,624.93	265.30	5,752.22
17	Santa Cruz Muluá	600.76	259.21	2,094.32	1,979.12	4,933.40
18	Santa Barbara	106.55	91.58	1,983.65	1,590.63	3,772.41
19	San Antonio Suchitepéquez	278.56	2.23	1,281.06	1,269.90	2,831.74
20	Iztapa	1,638.32	391.50	448.24	14.94	2,492.99
21	Chicacao	310.77	106.40	933.97	631.26	1,982.41
22	Retalhuleu	331.96	107.03	722.36	296.79	1,458.14
23	Cuyotenango	134.43	81.47	576.71	503.83	1,296.44
24	Mazatenango	70.87	27.50	424.86	462.53	985.76
25	San Lorenzo	273.10	33.42	392.98	137.30	836.80
26	Yepocaca	4.14	2.35	90.14	481.06	577.69
27	Palín	2.50	2.62	151.87	337.34	494.34
28	Pochuta	10.69	6.91	211.74	203.16	432.49
29	San Bernardino	44.43	0.00	174.41	189.10	407.94
30	Villa Canales	207.95	18.94	135.99	17.46	380.33
31	San Miguel Panan	19.92	0.00	81.69	40.25	141.86
32	Alotenango	0.23	0.17	11.88	88.76	101.04
33	San Juan Bautista	2.37	2.08	46.98	39.92	91.35
34	Amatitlán	2.92	1.28	16.64	18.96	39.79
35	El Asintal	3.57	0.92	16.66	18.11	39.27
36	Nuevo San Carlos	0.38	0.08	2.25	5.81	8.52
37	Santa María de Jesús.	0.05	0.06	0.90	5.69	6.70
38	Petapa	0.42	0.29	1.97	1.96	4.62
39	San Sebastián.	0.00	1.05	0.68	2.87	4.60
40	Antigua Guatemala	0.00	0.02	0.91	2.15	3.08
Total General		107,588.19	24,431.92	108,735.47	41,996.53	282,752.10
Porcentaje		38%	9%	38%	15%	100%

El cuadro 6 muestra la cantidad de área de cultivo de caña de azúcar que posee cada municipio y el nivel de erosión en el que se encuentra dicha área. Como se puede observar, los municipios con mayor cantidad de área son La Gomera, Santa Lucía Cotz. y La Democracia del departamento de Escuintla. De estos tres municipios, Santa Lucía Cotz. muestra una mayor cantidad de área en nivel de erosión muy fuerte y esto se debe a que el municipio cuenta con áreas cultivadas arriba de los 300 msnm y que su precipitación anual es mayor que la de los otros municipios. El municipio que presenta una menor cantidad de área con cultivo de caña de azúcar el Antigua Guatemala, con 3 hectáreas únicamente.

Cuadro 7. Estimación de área según nivel de erosión por cuenca y municipio EUPS.

Cuenca	Municipio/Nivel de erosión	Nula a leve	Moderada	Fuerte	Muy fuerte	Total área (Ha)
Río Acomé	La Democracia	7,752.77	972.68	7,380.24	663.49	16,769.18
	La Gomera	22,354.87	3,870.31	12,213.25	846.95	39,285.38
	Santa Lucía					
	Cotzumalguapa	3,471.59	939.41	8,211.49	1,502.78	14,125.27
	Siquinalá	187.02	1.91	1,951.47	664.70	2,805.10
	La Gomera	12,505.56	3,983.54	2,539.86	118.73	19,147.69
Río Coyolate	Nueva Concepción	2,016.37	385.24	2,215.42	241.89	4,858.92
	Patulul	1,058.66	411.76	3,539.35	1,872.40	6,882.17
	Santa Lucía					
	Cotzumalguapa	2,707.55	435.16	8,133.87	8,179.01	19,455.59
	Siquinalá	6.48	2.67	410.69	522.04	941.88
	Yepocaca	4.14	2.35	90.14	481.06	577.69
Río Achiguate	Alotenango	0.23	0.17	11.88	88.76	101.04
	Antigua Guatemala	0.00	0.02	0.91	2.15	3.08
	Escuintla	1,545.13	432.09	5,540.54	4,777.63	12,295.38
	La Democracia	3,949.29	466.24	4,389.78	722.12	9,527.43
	La Gomera	235.68	16.32	128.57	4.11	384.68
	Masagua	1,691.36	174.51	1,208.51	76.19	3,150.57
Río Madre Vieja	San José	3,841.33	332.59	1,982.61	52.61	6,209.14
	Siquinalá	248.92	88.59	2,690.88	1,803.33	4,831.72
	Nueva Concepción	396.54	63.86	409.50	23.41	893.31
	Patulul	368.03	153.75	1,413.78	881.20	2,816.76
	Pochuta	10.69	6.91	211.74	203.16	432.49
	Río Bravo	56.16	58.91	179.74	141.33	436.13
Río María Linda	San Juan Bautista	2.37	2.08	46.66	39.91	91.03
	Santa Barbará	12.36	23.72	100.95	66.63	203.66
	Tiquisate	1,990.55	306.26	1,593.17	75.34	3,965.32
	Amatitlán	2.92	1.28	16.64	18.96	39.79
Río María Linda	Escuintla	851.23	332.04	3,740.84	1,456.48	6,380.58
	Guanagazapa	2,752.68	953.73	2,043.85	467.38	6,217.65
	Iztapa	1,638.32	391.50	448.24	14.94	2,492.99

	Masagua	11,042.13	2,496.91	6,176.27	416.60	20,131.91
	Palín	2.50	2.62	151.87	337.34	494.34
	Petapa	0.42	0.29	1.97	1.96	4.62
	San José	1,593.60	133.33	609.10	18.70	2,354.73
	Santa María de Jesús.	0.05	0.06	0.90	5.69	6.70
	Taxisco	2,745.62	875.45	717.83	51.78	4,390.68
	Villa Canales	207.95	18.94	135.99	17.46	380.33
	Chicacao	310.77	106.40	933.97	631.26	1,982.41
	Río Bravo	1,449.73	398.45	2,564.86	1,133.96	5,547.00
	San Antonio					
	Suchitepéquez	237.20	1.63	1,066.19	1,122.75	2,427.77
	San Bernardino	0.58	0.00	10.22	10.28	21.08
Río Nahualate	San José El Ídolo	584.01	273.99	2,118.10	1,792.23	4,768.34
	San Juan Bautista	0.00	0.00	0.32	0.00	0.32
	San Lorenzo	119.62	18.46	191.00	12.88	341.97
	San Miguel Panan	19.92	0.00	81.69	40.25	141.86
	Santa Barbará	94.19	67.86	1,882.70	1,524.00	3,568.75
	Santo Domingo					
	Suchitepéquez	1,344.84	333.67	1,662.71	165.98	3,507.20
	Tiquisate	10,156.69	3,067.01	6,899.40	730.39	20,853.50
	El Asintal	3.57	0.92	16.66	18.11	39.27
Río Ocosito	Nuevo San Carlos	0.38	0.08	2.25	5.81	8.52
	Retalhuleu	300.49	99.89	686.00	294.76	1,381.15
Río Paso Hondo	Taxisco	3,277.42	871.79	1,084.50	68.50	5,302.21
	Retalhuleu	31.46	7.13	36.36	2.03	76.98
Río Samalá	San Andrés Villa Seca	99.99	61.52	509.19	487.51	1,158.20
	San Sebastián.	0.00	1.05	0.68	2.87	4.60
	Santa Cruz Muluá	600.76	259.21	2,094.32	1,979.12	4,933.40
	Cuyotenango	134.43	81.47	576.71	503.83	1,296.44
	Mazatenango	70.87	27.50	424.86	462.53	985.76
	San Andrés Villa Seca	530.89	254.63	2,004.92	2,050.43	4,840.87
Río Sis-Icán	San Antonio					
	Suchitepéquez	41.36	0.60	214.86	147.16	403.97
	San Bernardino	43.85	0.00	164.19	178.82	386.86
	San José El Idolo	261.64	60.06	876.77	407.52	1,605.99
	San Lorenzo	153.48	14.96	201.97	124.41	494.83
	Santo Domingo					
	Suchitepéquez	468.98	86.43	1,791.56	1,240.94	3,587.91
	Total	107,588.19	24,431.92	108,735.47	41,996.53	282,752.10

En el cuadro 6 se detallan las de cultivo de caña de azúcar por cuenca y por municipio. Este cuadro nos indica que municipios abarca cada una de las cuencas y como está distribuida la erosión para cada municipio. Como se puede observar, existen municipios que poseen áreas en dos o más cuencas, lo que nos indica que la erosión hídrica podría ser analizada a nivel de municipio y diferenciarla para la cuenca a la que drenen las áreas. Un ejemplo es el municipio de La Gomera, el cual posee áreas en cuenca río

Coyolate, rio Acomé y rio Achiguate. Esto nos indica la complejidad de analizar la erosión en este municipio y que las recomendaciones deberán ser específicas para cada una de las áreas.

VII. CONCLUSIONES

Según la información recopilada y generada, la EUPS estima para la zona cañera del la vertiente del Pacífico, con un total de 282,752.10 hectáreas analizadas, 107,588.19 presentan erosión nula a leve, 24,431.92 presentan erosión moderada, 108,735.47 presentan erosión fuerte y 41,996.53 presentan erosión muy fuerte.

Las zonas más susceptibles a la erosión se encuentran en la parte alta de la zona cañera (>300 msnm) con una erosión que va de fuerte a muy fuerte, esto se debe a las altas precipitaciones y pendientes pronunciadas que existen, mientras que en la parte media y baja (<300 msnm) de la zona cañera, la erosión es menor; con rangos que van desde fuerte a nula o leve.

Según USLE-EUPS el 53% del área presenta un peligro de erosión fuerte a muy fuerte (50 a más de 200 Ton/Ha/año), lo cual nos indica que la pérdida de suelo por año es considerable, por lo que se deben tomar medidas para evitar o reducir al mínimo las pérdidas.

VIII. RECOMENDACIONES

Continuar con los análisis de la erosión hídrica en la zona, con cartografía a mayor detalle y acompañada con verificación de campo, así poder realizar recomendaciones más concretas a áreas con altas tasas de erosión.

Realizar un inventario de prácticas de conservación de suelos que permita la elaboración de cartografía de prácticas de conservación de suelos en la zona cañera (Factor P) y poder recomendar en base a los niveles de erosión diferentes prácticas o estructuras de conservación como: manejo de épocas de siembra, abonos verdes, técnicas de manejo de relieve, técnicas de control de escurrimiento.

Realizar estudios de erosión que permitan estimar o asignar un valor económico al suelo erosionado, incluyendo la cuantificación de pérdidas de área efectiva a causa de la erosión hídrica.

Realizar una actualización de los factores que se utilizan en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS-USLE), Factor K, Factor R conforme se genere información actualizada de dichos factores.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Almorox, A. (2010). La degradación de los suelos por erosión hídrica de estimación. Murcia, Universidad de Murcia. España. 384p.
- Arana López, G. (1992). Análisis espacial para evaluar la erosión hídrica en la sub cuenca del rio Pensativo, Guatemala. Costa Rica: CATIE. 136p.
- CENGICAÑA. (2012). El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala. Guatemala. CENGICAÑA. 512 p.
- 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 la erosión hídrica. Nicaragua, FARENA (Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente de la Universidad Nacional Agraria). 61 p.
- Escalante, S. (2005). La medición de sedimentos en México. Tabasco, México: IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua)-UJAT (Universidad Juárez Autónoma de Tabasco). 318 p.
- FAO. IT. (1997a). Capacitación sobre el manejo y conservación de suelos. Nigeria. IITA (International Institute or Tropical Agriculture). 225 p.
- FAO. (1997b). Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y la escorrentía. Roma, Italia: FAO. 161 p.
- FAO. (2000). Manual de practicas integradas de manejo y conservacion de suelos. Nigeria: IITA 234 p.
- Hudson, N. (1982). Conservación de suelos. España: Reverté. 352 p.
- Ingeniería de Campo Ltda. (1996). Estudio semi detallado de suelos de la zona cañera sur de Guatemala. García Et al. Segunda edición. Guatemala: CENGICAÑA. 216 p.
- Kirby, M; Morgan, R. (1984). Erosión de suelos. México: Limusa. 375 p.
- Latorre, L; Beguería, S. (2009). Los modelos de erosión: una revisión. España: Sociedad Española de Geomorfología. 194 p.

- MARN (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, GT). (2009). Informe ambiental del estado: GEO Guatemala. Guatemala: MARN. 286p.
- Medina, C. (2009). Modelos numéricos y teledetección en el lago de Izabal, Guatemala. España: UCA (Universidad de Cádiz). 294 p.
- Morgan, R. 1997. Erosión y conservación del suelo. Barcelona, España: Editorial Aedos. 342 p.
- Núñez Solís, J. (2001). Manejo y conservación de suelos. San José, Costa Rica: EUNED (Editorial Universidad Estatal a Distancia). 267 p.
- Orrego León, E. A. (2012). Diagnostico e informe de servicios en el Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC), Santa Lucia Cotz., Escuintla. Guatemala. ICC-CUNSUROC (Centro Universitario Regional Sur Occidente).
- 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.
- Prieto Bolívar, C. (2004).El agua: Sus formas, efectos, abastecimientos, usos, daños, control y conservación. Bogotá, Colombia: ECOE. 277 p.
- Rafaelli, S; López, F; Almorox, A. 2010.La degradación de los suelos por erosión hídrica: métodos de estimación. España; Editorial Editum. 384 p.
- Reyes García, L. (2010). Diagnóstico general de los recursos naturales renovables, determinación de la erosión hídrica y servicios prestados en la aldea Tzamjuyub, Tesis de grado. Nahualá. Sololá. Guatemala: FAUSAC (Facultad de Agronomía Universidad San Carlos de Guatemala).
- Rio, J. 2012. Calculo de producción de sedimentos en la subcuenca del rio Ruiz, PA; Aparicio Mijares, J. 2005. La medición de sedimentos en Mexico, Mexico: IMTA. 318 p.
- Rivera Trejo, F; Gutiérrez López, A; Val Segura, R; Mejía Zermeño, R; Sánchez Ruiz, P; Aparicio Mijares, Et al. (2005). La medición de sedimentos en México. México: IMTA. 318 p.
- Salguero, M. (2010). Ecuación de pérdida de suelo por erosión hídrica (USLE). Guatemala: FAUSAC. 10 p.
- Santos Pérez, A. L. (2014). Estudio de la erosión hídrica en la parte alta de la zona cañera, micro cuenca Los Sujuyes, diagnostico y servicios en el Instituto

Privado de Investigación sobre Cambio Climático, Santa Lucia Cotz., Escuintla.
Guatemala: ICC-FAUSAC

Taboada, J. (2003). Dinámica de sedimentos en cuencas hidrográficas. Montecillos,
México: Universidad de Chapingo. 117 p.

TRAGSA. (1998). Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de erosión.
Coord., López, Filiberto. Segunda edición. Agustín de Bethencourt. Madrid.
Grupo TRAGSA. 945 p.

TRAGSA. (2003) La ingeniería en los procesos de desertificación. Coord., López,
Filiberto. Primera edición. Maldonado, 58. 28996 Madrid. Grupo TRAGSA. 1003
p.

X. ANEXOS

Cuadro 8. Precipitación promedio anual por estación meteorológica.

Red de Estaciones Meteorológicas ICC.

Estación	Longitud	Latitud	Precipitación/año (mm)
Lorena	-91.419603	14.520233	4356.00
Cengicaña	-91.055468	14.330962	4186.42
Balsamo	-91.003744	14.281468	3666.78
Costa brava	-90.920738	14.237773	3230.58
Naranjales	-91.476996	14.365688	2593.07
Tulula	-91.586101	14.506967	2519.08
Puyumate	-91.259910	14.261557	2245.48
San Rafael	-90.634491	14.023491	2038.13
Tehuantepec	-91.103443	14.168625	1993.60
Bouganvilia	-90.933352	14.117690	1892.28
Trinidad	-90.844006	14.153762	1823.90
Amazonas	-90.769984	14.066614	1816.20
Peten Of	-91.411898	14.260987	1796.96
Bonanza	-91.187235	14.078341	1692.24
San Antonio	-91.200961	13.995364	1549.36
Irlanda	-91.426867	14.145889	1446.96

Los diferentes mapas y cuadros mencionados en esta tesis pueden ser consultados accediendo al siguiente link www.icc.org.gt .