

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA PROGRAMA
DE ENSEÑANZA AREA DE POSGRADO

ANÁLISIS ESPACIAL PARA EVALUAR LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA SUBCUENCA
DEL RÍO PENSATIVO, GUATEMALA

Tesis sometida a la consideración del comité Técnico Académico
del programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y
Recursos Naturales del Centro Agronómico Tropical de
Investigación y Enseñanza, para optar al grado de

Magister Scientiae

Por

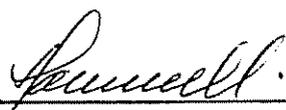
GUSTAVO ARSENIO ARANA LÓPEZ

Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
Turrialba, Costa Rica
1992

Esta tesis ha sido aceptada, en su presente forma, por la coordinación del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales Renovables del CATIE aprobada por el Comité Asesor del estudiante como requisito parcial para optar al grado de:

MAGISTER SCIENTIAE

FIRMANTES:

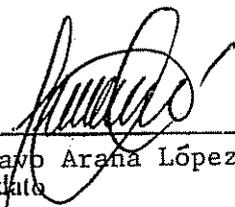


Mag. Sc. Jorge Faustino
Profesor Consejero

Ph. D. Assefaw Tewelde
Jefe, Area de Posgrado



Ph. D. Ramón Lastra
Director, Programa de Enseñanza



Gustavo Arana López
Candidato

DEDICATORIA

A DIOS

A MIS PADRES: María del Carmen López de Arana y Concepción Arana Figueroa.

A MI ESPOSA: Mayra Iveth González Dávila

A MI PEQUEÑA HIJA: Mariela Ivhet Arana González

A MI FUTURO HIJO (A)

A MIS HERMANOS: Efraín, Aura, Carlos y Luz Amparo.

A MIS SOBRINITOS: Hermanos Ramírez Arana, Carlitos y Mayrita.

A MI ABUELO: Manuel Isidro López Rodríguez. (Q.P.D)

A MIS TIOS Y PRIMOS

A LOS COMPANEROS DE PROMOCIÓN 1990-1992 especialmente a:

José Manuel Marquez (Guatemala), Jorge Rodríguez (Nicaragua), Gerardo Rodríguez (Honduras), Almeida Siteo (Mozambique), Shuichi Okiomoto (Japón) Mirna Barrios (Nicaragua).

A LA FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

A LA ESCUELA NACIONAL CENTRAL DE AGRICULTURA (ENCA)

A GUATEMALA EL PAÍS DE LA ETERNA PRIMAVERA

AL CAMPESINADO GUATEMALTECO

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su más sincero agradecimiento a las siguientes personas e instituciones, que colaboraron en la realización de la presente Investigación.

Al Profesor Consejero Jorge Faustino. Por su valiosa orientación en la conducción de la investigación.

A los miembros del comité, especialmente al M. Sc. Sergio Velázquez, por su asesoramiento en el manejo de sistemas de información geográfico y correcciones finales.

Al Ph. D. Jean Collinet. Por sus oportunas sugerencias.

Al los Profesores de la Facultad de Agronomía: Hugo Tobías, Maxedelio Herrera y José Chonay Pantzay. Por brindar información valiosa, para realizar la investigación.

Al Ing. Gilberto Alvarado, por su asesoramiento en la fotointerpretación.

Al Proyecto RENARM/CUENCAS del CATIE. Fuente de beca

Al personal del Centro de Cómputo del CATIE.

A todas las instituciones del sector público de Guatemala, especialmente a La Dirección General de Bosques y Vida Silvestre (DIGEBOS), Dirección de Riego y Avenamiento (DIRYA), Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola (ICTA), Instituto de Sismología, Vulcanología e hidrología (INSIVUMEH).

A la familia Marquez Alemán, especialmente a Doris por su fina atención.

BIOGRAFIA

El autor nació el 14 de mayo de 1961 en el municipio de Zaragoza, del departamento de Chimaltenango, de la República de Guatemala.

Hizo parte de sus estudios primarios en dicho municipio y los concluyo en la Ciudad de Guatemala.

En el años de 1979 ingreso a la Escuela Nacional Central de Agricultura, donde obtuvo el título de Perito Agrónomo, en 1981.

En 1982 Ingreso a la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala, donde se le otorga el título de Ingeniero Agrónomo en Recursos Naturales Renovables, en el grado de Licenciado en Ciencias Agrícolas.

En 1986 presta sus servicios a la Escuela Nacional Central de agricultura, donde desempeño los cargos de docente y coordinador del área de investigación e industrias forestales, en la carrera de Dasónomo.

En 1988 desempeña los cargos de coordinador de investigación y catedrático de los cursos de Dasometría, Silvicultura y Sistemas Agroforestales en el Centro Regional Universitario de Petén de la Universidad de San Carlos, en la carrera de Técnico en Conservación y Manejo de Bosques Tropicales.

En 1990 ingresa en el programa de posgrado del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza y en septiembre de 1992 se le otorga el título de Magister Scientiae en Manejo Integrado de Recursos Naturales con énfasis en la Planificación y Manejo de Cuencas Hidrográficas.

CONTENIDO

	Página
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
BIOGRAFIA	v
CONTENIDO	vi
RESUMEN	ix
SUMMARY	xi
LISTADO DE CUAROS	xii
LISTADO DE FIGURAS	xvi
CUADROS ANEXOS	xviii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivos generales.....	3
1.2. Objetivos específicos.....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Evaluación de la erosión.....	4
2.1.1. Métodos directos.....	4
2.1.2. Resultados de evaluaciones en parcelas de escorrentía en la subcuenca del río Pensativo.....	4
2.1.3. Modelos de predicción.....	6
2.2. Estudios realizados en la subcuenca del río Pensativo.....	8
2.2.1. Problemas de sedimentación e inundaciones en la parte baja de la subcuenca.....	9
2.2.2. Limitaciones de la USLE.....	10
2.2.3. Descripción del modelo USLE.....	11
2.2.4. Erosividad de las lluvias (factor R).....	12
2.2.5. Parámetro Energía-Intensidad (EI).....	13
2.2.6. Erodabilidad del suelo (Factor K).....	14
2.2.7. Factor Topográfico (LS).....	16
2.2.8. Factor de cobertura (C).....	17
2.2.9. Factor de prácticas de conservación (P) ...	18
2.3. Descripción del modelo para estimar la tolerancia	19
2.4. Aplicaciones de los sistemas de información geográfico	20
III. MATERIALES Y METODOS.....	27
3.1. Localización del área de estudio	27
3.2. Recursos utilizados.....	27
3.2.1. Cartográficos.....	27
3.2.2. Fotogramétricos.....	29
3.2.3. Equipo.....	29
3.2.4. Materiales.....	29
3.3. Determinación de los factores de la USLE a nivel de subcuenca.....	30

3.3.1. Factor de erosividad de la lluvia (R).....	30
3.3.2. Factor erodabilidad del suelo (K).....	31
3.3.3. Factor longitud (L).....	34
3.3.4. Factor pendiente (S).....	38
3.3.5. Factor cobertura-prácticas de conservación (CP)	39
3.3.6. Factor de cobertura y práctica (C y P)....	39
3.4. Determinación de la pérdida tolerable en cada tipo de suelo.....	40
3.5. Cuantificación espacial de las pérdidas de suelo en los años 1973, 1980, 1992 y modelando la prá- ctica barrera viva con acequia a un distanciamiento de 30 metros	42
3.6. Cuantificación e identificación de áreas con diferentes grados de erosión en los años 1973, 1980 y 1992	42
3.7. Cuantificación e identificación de áreas cuya erosión excede a los niveles de tolerancia.....	43
3.8. Cuantificación e identificación de los tipos de suelo con niveles de erosión mayores a la tolerancia, en los años 1973, 1980 y 1992	44
3.9. Estimación de Costos	44
3.10. Modelo cartográfico aplicado a un sistema de información geográfico	46
3.11. Variables analizadas a nivel de parcelas de escorrentía.....	46
3.12. Diseño experimental y tratamientos.....	49
3.13. El modelo estadístico utilizado para analizar las variables de respuesta fue	49
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	52
4.1. Factores de la ecuación universal de pérdida de suelo a nivel de subcuenca.....	52
4.1.1 Factor de erosividad de las lluvias (R).....	52
4.1.2 Factor de erodabilidad de suelo (K).....	55
4.1.3 Factor longitud de pendiente (L).....	56
4.1.4 Factor pendiente (S).....	57
4.1.5 Factor Cobertura-Prácticas de conservación (CP)	58
4.1.6 Factor cobertura (C)	61
4.1.7 Factor de Prácticas de conservación (P).....	61
4.2. Valores de tolerancia según tipo de suelo.....	63
4.3. Valores de Pérdida de suelo en los años 1973, 1980 y 1992 y haciendo modelación para el año 1992	63

4.4.	Rangos de erosión, durante los años 1973, 1980, 1992 y modelando para las aéreas bajo la práctica tradicional.....	66
4.5.	Clasificación de la erosión según tolerancia durante los años 1973, 1980, 1992 y modelando en áreas bajo la práctica tradicional.....	71
4.6.	Cuantificación del sedimento en suelos que sobrepasan el límite de tolerancia permisible.....	72
4.7.	Pérdida de suelo, para períodos de retorno de cinco y diez años	83
4.8.	Pérdida de suelo en áreas bajo la práctica tradicional comparado con la práctica barrera viva.....	83
4.9.	Estimación de costos.....	87
	4.9.1 En la implantación de una práctica de conservación.....	87
	4.9.2 Por remoción de sedimento.....	88
4.10.	A nivel de parcelas de escorrentía.....	89
	4.10.1. Sedimento.....	89
	4.10.2. Escorrentía.....	91
	4.10.3. Carga sólida específica.....	95
	4.10.4. Rendimiento.....	96
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	99
	VI. BIBLIOGRAFÍA.....	104
	VII. ANEXO.....	109

ARANA LOPEZ, GUSTAVO A. 1992. Tesis Mag. Sc. CATIE. 118 p.
Análisis espacial para evaluar la erosión hídrica en la
subcuenca del río Pensativo, Guatemala.

RESUMEN

Palabras claves: Análisis espacial, erosión hídrica, producción de sedimento, ecuación universal de pérdida de suelo, USLE, tolerancia, modelo, modelación, sistemas de información geográfico, SIG, período de retorno, riesgo, probabilidad de ocurrencia, sedimento, escorrentía, carga sólida específica, maíz, frijol, fotografía aérea, Guatemala.

La presente investigación se realizó en la subcuenca del río Pensativo ubicada en el departamento de Sacatepéquez, de la república de Guatemala. Dicha subcuenca año con año produce una gran cantidad de sedimento, la cual es depositada en la parte baja, causando pérdidas económicas principalmente por concepto de remoción de sedimento.

El estudio consistió en un análisis espacial y temporal de la erosión hídrica mediante la ecuación universal de pérdida de suelo y un sistema de información geográfico, con los objetivos de cuantificar y analizar las pérdidas de suelo en los años 1973, 1980 y 1992.

Para el efecto se utilizó información de 10 estaciones pluviométricas, mapas básicos de suelo y topográfico, así como fotografías aéreas tomadas en diferentes décadas. También se utilizó información proveniente de cuatro años de registros de parcelas de escorrentía ubicadas dentro de la subcuenca.

La evaluación permitió establecer que las pérdidas de suelo estimada con el modelo de la USLE, las áreas con diferentes rangos de erosión, para los años 1973, 1980 1992 y para una modelación, son similares.

Las áreas de cultivo bajo la práctica tradicional no son las principales aportadoras de sedimento, estableciéndose que si se implantarán prácticas de conservación, la producción de sedimento se reduciría, según la USLE, en un 9%. Un porcentaje relativamente bajo (14%) de la subcuenca es la que aporta la mayor cantidad de sedimento.

Las áreas de cultivos cuya erosión excede al nivel de tolerancia permisible se localizan al norte la cumbre de San Mateo a la aldea San Mateo Milpas Altas; El Rejón, Vuelta Grande y Agua Colorada; al noreste, los cerros El Narizón y El Piñón; al suroeste, las áreas de San Miguel Milpas Altas,

los cerros El Astillero y La Libertad, así como todos los poblados independientemente de su ubicación.

En cuanto a las variables de las parcelas de escorrentía las prácticas de conservación de suelo mostraron un efecto benéfico sobre el control de la erosión, pero no en el rendimiento de los cultivos de maíz y frijol.

Las prácticas de conservación en el cultivo de maíz permiten el paso de grandes volúmenes de agua, sin embargo la concentración de sedimento en la misma no guarda la misma proporción, sino más bien muestra una tendencia contraria, por cuanto en el cultivo de frijol es en el que se observaron los valores más altos. Por lo tanto el cultivo de maíz bajo las prácticas de conservación tiende a permitir el paso del agua pero favorece la deposición de sedimento, especialmente la práctica de barrera viva.

Las prácticas más efectivas para el control de la erosión hídrica en el cultivo de frijol (Phaseolus vulgaris L.) son acequia con barrera viva, barrera viva y acequia con camellones en contorno, mientras que para el cultivo de maíz (Zea maiz L.) son barrera viva y acequia con barrera viva.

La práctica tradicional en ambos cultivos manifestó menor efectividad en el control de la erosión hídrica, aunque en menor cuantía en el cultivo de frijol.

ARANA, LOPEZ, GUSTAVO A. 1992. Thesis Mag. Sc. CATIE. 118p.
Spacial analysis to evaluate sheet erosion in the Pensativo
River watershed, Guatemala.

Key words: Spacial analysis, sheet erosion, sediment production,
universal soil loss equation, USLE, tolerance, model,
modeling, geographical information systems, GIS, return
period, risk, probability of occurrence, sediment, runoff,
specific solid load, maize, beans, aerial photograph,
Guatemala.

SUMMARY

This study was carried out in the Pensativo River watershed located in the Department of Sacatepéquez, Guatemala. Year after year, this watershed produces a great quantity of sediment, which is deposited in the lower part, causing economic losses, mainly through the removal of sediment.

The study included a temporary spacial analysis of hydric erosion using the universal soil loss equation and a geographical information system, with the objective of quantifying and analyzing soil losses in 1973, 1980 and 1992.

Information from ten rainy seasons, basic soil and topographical maps, and aerial photographs taken in different decades were used. Information from reports pertaining to four years of runoff plots located within the watershed were also utilized.

The evaluation led to the determination that soil losses estimated with the USLE model, for sites with different erosion ranges for 1973, 1980, 1992 and for modeling, are similar.

Areas with traditional cropping practices are not the principal contributors of sediment, since if conservation practices were implemented, sediment production would decrease by 9%, according to the USLE. A relatively low percentage (14%) of the watershed is that which contributes the majority of sediment.

Cropping areas whose erosion exceeds the permissible tolerance level, are located to the north of the San Mateo crest at the San Mateo Milpas Altas village; El Rejon, Vuelta Grande and Agua Colorada; to the northeast, the El Narizon and El Piñon hills; to the southwest, the areas of San Miguel Milpas Altas, the hills El Astillero and La

Libertad, as well as all of the towns regardless of their locations.

As far as the runoff plot variables are concerned, soil conservation practices showed a beneficial effect on erosion control, but not in maize and bean crop yields.

Conservation tactics in maize cropping permit great amounts of water to flow; however, sediment concentration is the same, they do not maintain the same proportion, but instead show a tendency to do the opposite. The highest values can be observed in bean crops. Thus, the corn crop using conservation tactics tends to permit water passage, but also favors the deposition of sediment, especially with live barriers are used.

The most effective practices for hydric erosion control in beans (*Phaseolus vulgaris* L.) are canals with live barriers, live barriers and canals with contour furrows, while those for maize (*Zea mays* L.) are live barriers and furrows with live barriers.

Traditional practices in both crops show less affectivity in hydric erosion control, although less in beans.

LISTADO DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Valores de erodabilidad para algunas series de suelo de Guatemala.....	8
2	Valores del coeficiente m para la obtención del factor LS.....	38
3	Valores de tolerancia en mm/año según profundidad efectiva de suelo.....	41
4	Clasificación de la erosión en rangos.....	43
5	Categorías asignadas según niveles de erosión y tolerancia permisible.....	44
6	Categorías asignadas a suelos cuyo nivel de erosión excede al nivel de tolerancia permisible.....	45
7	Factor de erosividad de las lluvias en MJ.mm por ha.h.año para precipitaciones medias y períodos de retorno de cinco y diez años.....	52
8	Probabilidad de ocurrencia y no ocurrencia que una lluvia con potencial erosivo de 7178.09 MJ.mm/ha.h.año se presente en los próximos años.....	53
9	Probabilidad que el fenómeno no ocurra en años sucesivos y probabilidad de riesgo que el fenómeno ocurra en por lo menos una vez en n años sucesivos.....	53
10	Valores de K según suelo y uso de la tierra...	57
11	Valores del factor S asignado a cada rango de pendiente.....	58
12	Análisis de varianza para los factores CP, para los cultivos de maíz y frijol, bajo cuatro prácticas de conservación de suelo ajustado por la Intensidad máxima.....	61
13	Comparación de medias de los factores CP según prueba t.....	62

14	Valores del factor C utilizados en la USLE para la evaluación de la erosión hídrica.....	62
15	Factor de prácticas según cultivos.....	63
16	Quantificación de las pérdidas de suelo a nivel de subcuenca.....	65
17	Quantificación de las pérdidas de suelo en ton/ha para cada rango establecidos.....	71
18	Porcentaje de área que ocupa cada rango de erosión.....	71
19	Quantificación de las pérdidas de suelo en áreas con erosión igual, menor y mayor que el nivel de tolerancia permisible.....	72
20	Quantificación de áreas con erosión igual, menor y mayor que el nivel de tolerancia permisible.....	72
21	Quantificación de las pérdidas de suelo en áreas que sobrepasan el límite de tolerancia permisible en los diferentes tipos de suelo...	77
22	Areas en porcentaje, según clase de suelo que sobrepasan el límite de tolerancia permisible, en los diferentes tipos de suelo.....	78
23	Pérdidas de suelo en toneladas por hectárea por año de las categorías de suelo, variando el factor R.....	83
24	Porcentajes de área correspondientes a las pérdidas de suelo indicada en el cuadro 23....	83
25	Quantificación de las pérdidas en áreas bajo la práctica tradicional y suponiendo la implantación de la práctica barrera viva.....	87
26	Porcentajes de áreas agrícolas bajo la práctica tradicional.....	87
27	Estimación de costos de sustitución de la práctica tradicional por la práctica barrera viva.....	88
28	Análisis de varianza para el sedimento ocurrido en los cultivos de maíz y frijol, ajustado por la covariable intensidad máxima.....	90

29	Sedimento registrado, para el cultivo de maíz y frijol, según práctica de conservación de suelo...	90
30	Análisis de varianza, para la variable escorrentía, en los cultivos de maíz y frijol bajo cuatro prácticas de conservación de suelo, ajustado por la intensidad máxima.....	93
31	Prueba de medias para la variable escorrentía superficial en los cultivos de maíz y frijol según prácticas de conservación de suelo.....	93
32	Análisis de varianza para la variable carga sólida específica ocurrida en el cultivo de maíz y frijol bajo cuatro prácticas de conservación de suelo, ajustado por la precipitación.....	95
33	Comparación de medias para la variable carga sólida específica, en los cultivos de maíz y frijol según prácticas de conservación de suelo, ajustado por la precipitación.....	96
34	Análisis de varianza para el rendimiento de los cultivos de maíz y frijol bajo cuatro o prácticas de conservación de suelo ajustado por la intensidad máxima.....	98
35	Rendimiento promedio de los cultivos maíz y frijol bajo cuatro prácticas conservación de suelo.....	98

LISTADO DE FIGURAS

Figura		Página
1	Localización de la subcuenca del río Pensativo..	28
2	Nomograma en unidades del sistema internacional, para determinar el factor de erodabilidad del suelo (K).....	35
3	Modelo cartográfico para evaluar el proceso de erosión hídrica utilizando la USLE y un sistema de información geográfico, en la subcuenca del río pensativo.....	47
4	Sección transversal de las prácticas evaluadas en el cultivo de maíz.....	50
5	Sección transversal de las prácticas evaluadas en el cultivo de frijol.....	51
6	Mapa de pendientes de la subcuenca del río Pensativo.....	59
7	Mapa de suelos y profundidad efectiva del río Pensativo.....	64
8	Mapa de rangos de erosión en 1973.....	67
9	Mapa de rangos de erosión en 1980.....	68
10	Mapa de grados de erosión en 1992.....	69
11	Mapa de grados de erosión haciendo modelación...	70
12	Mapa de áreas cuya erosión es igual, menor y mayor al nivel de tolerancia permisible en 1973.....	73
13	Mapa de áreas cuya erosión es igual, menor y mayor al nivel de tolerancia permisible en 1980.....	74
14	Mapa de áreas cuya erosión es igual, menor y mayor al nivel de tolerancia permisible en 1992.....	75
15	Mapa de áreas cuya erosión es igual, menor y mayor al nivel de tolerancia permisible, haciendo modelación.	76

16	Mapa de áreas de suelos cuya producción de sedimento es superior al nivel de tolerancia permisible en 1973.....	79
17	Mapa de áreas de suelos cuya producción de sedimento es superior al nivel de tolerancia permisible en 1980.....	80
18	Mapa de áreas de suelos cuya producción de sedimento es superior al nivel de tolerancia permisible en 1992.....	81
19	Mapa de áreas de suelos cuya producción de sedimento es superior al nivel de tolerancia permisible, haciendo modelación.....	82
20	Mapa de rangos de erosión en to/ha de la Subcuenca del río Pensativo suponiendo una precipitación media anual con un período de retorno de cinco años.	84
21	Mapa de rangos de erosión en to/ha de la Subcuenca del río Pensativo suponiendo una precipitación media anual con un período de retorno de diez años.	85
22	Efecto de dos períodos de retorno sobre la producción de sedimento en la subcuenca del río Pensativo.....	86
23	Pérdidas de suelo según práctica y cultivo.....	92
24	Niveles de escorrentía según práctica y cultivo.....	94
25	Carga sólida específica según práctica y cultivo.	97

CUADROS ANEXOS

Cuadro	Página
1A	Valores promedios de la información básica para determinar el factor K en t.ha.h por ha.MJ.mm..... 110
2A	Valores del coeficiente B para calcular el exponente m para obtener el factor LS..... 111
3A	Base de datos provenientes de información de parcelas de escorrentía..... 113
4A	Valores de precipitación media en mm/año y para periodos de retorno de cinco y diez años por estación..... 116
5A	Valores de erosividad de la lluvia media en MJ.mm/ha.hora.año media y para periodos de retorno de cinco y diez años por estación..... 116
6A	Valores del factor LS, según porcentaje y longitud de la pendiente..... 117

I. INTRODUCCIÓN

Según Leonard J.H. (1986) en América Central, Guatemala es el país que tiene mayor grado de degradación del recurso suelo, después de El Salvador, ya que presenta un rango de 25 a 35% de tierra seriamente erosionada o degradada.

Curley y Urizas, citados por Rosal (1988), consideran que del total de lluvia precipitada en Guatemala, el 75% se escurre y arrastra a su paso suelo de cultivos o suelos forestales.

Uno de los principales problemas que afrontan las cuencas hidrográficas es la degradación del recurso suelo por efecto de la erosión hídrica.

La evaluación de las pérdidas de suelo, producto de la erosión hídrica, puede realizarse utilizando métodos directos como transeptos en cárcavas, clavos con roldanas, muestreo probabilístico y parcelas de escorrentía; con métodos indirectos, mediante la utilización de modelos, siendo éstos últimos los más adoptables en países en desarrollo, fundamentalmente debido a su bajo costo. Bork, H.R. (1991), considera que el uso de modelos, es el método de menor costo y más efectivo que puede ser extremadamente útil para evaluar el impacto de técnicas de conservación de suelo y aguas.

Por lo tanto en países como Guatemala, la utilización del modelo de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE, por sus siglas en inglés) combinado con un sistema de información geográfico (SIG), puede ser una opción para realizar evaluaciones de pérdida de suelo, por efecto de la erosión hídrica a nivel de cuencas hidrográficas.

La presente investigación consistió en un análisis en el tiempo y espacio así como en una modelación del proceso de erosión hídrica en la subcuenca del río Pensativo de Guatemala. Para el efecto se utilizó el modelo de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) propuesta por Wischmeier y Smith (1978) y un sistema de información geográfico (SIG).

La información generada servirá de base para sugerir prácticas de conservación que tiendan a la rehabilitación de la subcuenca, con el objeto de mantener la productividad de los cultivos en el largo plazo, reducir el proceso de sedimentación e inundaciones en la parte baja de la subcuenca, reducir pérdidas económicas por concepto de daños a infraestructura y costos de remoción de sedimento.

1.1. Objetivos generales

Contribuir al conocimiento del impacto de la erosión hídrica en la subcuenca del río Pensativo mediante la aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE), por medio de un sistema de información geográfico (SIG.)

Hacer un análisis integral de cuatro años de registros de datos medidos en parcelas de escorrentía, instaladas por el Instituto de Investigaciones Agronómicas de la Facultad de Agronomía (IIA), Universidad de San Carlos de Guatemala.

1.2. Objetivos específicos

Cuantificar las pérdidas de suelo de tipo laminar de la subcuenca del río Pensativo, mediante la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) y un sistema de información geográfico (SIG).

Analizar la dinámica de los niveles de erosión teórica de la subcuenca en los años 1973, 1980 y 1991.

Evaluar las pérdidas de suelo mediante modelación por efecto de implantar una práctica de conservación de suelo y agua en áreas que se encuentran bajo la práctica tradicional, en la subcuenca del río Pensativo.

Cuantificar e identificar espacialmente áreas que sobrepasan los niveles de tolerancia de pérdida de suelo en la subcuenca del río Pensativo.

Determinar el efecto de cuatro prácticas de conservación de suelo sobre el rendimiento, carga sólida específica y el control de erosión y escurrimiento en los cultivos de maíz y frijol.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Evaluación de la erosión

2.1.1. Métodos directos

Según Dunne, citado por Mora (1987), el método más confiable para cuantificar las pérdidas de suelo, es el análisis directo de las pérdidas de suelo bajo distintas condiciones de cobertura en periodos de varios años. A continuación se cita, algunos métodos usados para medir la degradación del suelo (FAO, 1979):

- Observaciones y mediciones directas
- Uso de técnicas de sensores remotos
- Modelos matemáticos
- Evaluación mediante métodos paramétricos

2.1.2. Resultados de evaluaciones en parcelas de escorrentía en la subcuenca del río Pensativo

Revolorio, Q. (1989) concluye que de las cuatro prácticas de conservación evaluadas en el cultivo de maíz (*Zea maiz* L.), tres de ellas redujeron el nivel de escorrentía y sedimento con respecto a la práctica tradicional, encontrando los menores valores en las prácticas de acequia con barrera viva y camellones en contorno con acequia. Otra conclusión de esta evaluación es que las prácticas de conservación de suelo evaluadas no mostraron efecto sobre el rendimiento en el cultivo de maíz (*Zea maiz* L.).

López, H. (1990) indica que bajo las condiciones de la evaluación, sólo las lluvias mayores de 5 mm provocaron

escurrimiento, mientras que el arrastre de partículas se generó, cuando la precipitación fue mayor a 20 mm y con una intensidad media mayor de 15 mm/hora. También concluye que de las cuatro prácticas evaluadas en el cultivo de frijol, (Phaseolus vulgaris L.), tres redujeron el escurrimiento superficial y la erosión respecto a la práctica tradicional. Las prácticas no mostraron efecto sobre el rendimiento en el cultivo de frijol.

Herrera, M; Tobías, H; Gálvez L. y Tojín S. (1990), al realizar la evaluación de cuatro prácticas de conservación de suelo bajo el cultivo de maíz (Zea maiz L.) llegan a conclusiones similares a las de López, H.

Pineda, C. (1991), concluye que bajo el cultivo de frijol (Phaseolus vulgaris L.), de las cuatro prácticas, las más efectivas para reducir el escurrimiento fueron los camellones en contorno con acequia y la acequia con barrera viva. Para el control de la erosión las más efectivas fueron la acequia con barrera viva, acequia con camellones en contorno y barrera viva. En cuanto a rendimiento encontró diferencias significativas, observándose el mejor rendimiento en las prácticas de camellones con acequias y acequias con barrera viva.

Chan, S. (1992), concluye que de las prácticas evaluadas las barreras vivas de zacatón (Panicum maximun) con acequias y acequias con camellones en contorno son las más efectivas para controlar el escurrimiento superficial en los cultivos de maíz (Zea maiz L.) y frijol (Phaseolus vulgaris L.).

En cinco años de evaluación, el escurrimiento superficial presentó una tendencia decreciente, en mayor

grado en tres prácticas de conservación en comparación con la práctica tradicional e indica que estos resultados se deben a la tendencia decreciente de la precipitación y a la estabilización de las prácticas de conservación.

Las prácticas de barrera viva de zacatón (Panicum maximun) con acequia y camellones en contorno con acequia manifestaron efectividad en el control de la erosión hídrica desde su establecimiento. La práctica barrera viva mostró una tendencia creciente y menor que las dos anteriores debido a que ésta depende del establecimiento de las plantas en la barrera viva y a la estabilización del terreno con el transcurso del tiempo.

Finalmente Chang, S. (1992) concluye que en cuanto a rendimiento no hay diferencias significativas entre las diferentes prácticas evaluadas.

2.1.3. Modelos de predicción

Bravo de León, (1988) realizó un estudio sobre la erosividad de las lluvias en Guatemala, (Factor R de lá USLE). El procedimiento consistió en un análisis de regresión lineal entre las variables, precipitación media anual de las estaciones con pluviógrafo y el índice de erosividad de dichas estaciones (variables independiente y dependiente respectivamente). Esto para cada provincia fisiográfica. Estos resultados fueron extrapolados a estaciones pluviométricas para finalmente obtener un mapa de isoerosividad, escala 1:100000.

En esta investigación se llegó a la conclusión que la región con mayor potencial erosivo, (2,000 a 34,000 MJ.mm/ha.hora.año) se localiza en la Planicie Costera del

Pacífico, mientras que la región con menor potencial erosivo se encuentra al Oeste del País. Sin embargo, plantea que en esta última la erosión puede ser mayor debido a factores de topografía y cobertura vegetal.

Rosado, P. et al (1992), usaron la USLE en Guatemala aplicada en el municipio de Patzité, del departamento de Quiché; la aldea de San Mateo Milpas Altas del municipio de Antigua Guatemala del Departamento de Sacatepéquez y en el Caserío El Mojón, del municipio y departamento de Jalapa. Estimaron valores de pérdida de suelo del orden de, 140.56 tm/ha/año, 213.40 tm/ha/año y de 74.14 tm/ha/año respectivamente.

Según OEA y el Centro Técnico de Evaluación Forestal de la República de Guatemala (1972), en Guatemala varias series de suelo tienen valor K que se muestra en el Cuadro 1. Se considera la erodabilidad de estos suelos como baja, lo cual explica, entre otros factores, el hecho que en muchas localidades de la región los materiales del suelo permanecen todavía después de cientos de años bajo cultivo intensivo, en declives, con escaso o ningún tratamiento de conservación de suelo.

En el documento se señala la necesidad en el corto plazo de aplicar la ecuación universal de pérdida de suelo con valores desarrollados para cada factor. Además se recomienda que se lleven a cabo mapas y estudios de daños a la tierra para propósitos ilustrativos, así como para análisis de beneficio/costo de ciertos tratamientos de tierra y prácticas de manejo y conservación de suelo, plantas y agua.

2.2. Estudios realizados en la subcuenca del río Pensativo

Rosal, (1988) indica que del total de la superficie dedicada a cultivos en la subcuenca del río Pensativo, un 70% es destinada a cultivos limpios, en fuertes pendientes.

Cuadro 1. Valores de erodabilidad para algunas series de suelo de Guatemala.

Serie	Nombre del suelo	Factor K	Localización
Cm	Camanchá franco	0.26	Montañas volcánicas
Tp	Totonicapán franco	0.21	Montañas volcánicas
Os	Ostuncalco, arena franca	0.14	Montañas volcánicas
Am	Amay franco arcilloso	0.08	Cerros de caliza
Cr	Carchá, franco limoso	0.16	Cerros de caliza
Ic	Ixcanac, arcilla	0.13	Cerros de caliza
Tq	Taquia, franco	0.20	Cerros de caliza
Chy	Choxoy, franco arcilloso	0.29	Cerros de caliza
Qi	Quiché, franco arcilloso	0.11	Altiplanicie central
Pz	Patsité, franco arenoso	0.15	Altiplanicie central
Po	Poaquil, franco arcilloso	0.14	Altiplanicie central
Mj	Marajuma, franco limoso	0.17	Altiplanicie central
Tc	Tecpán, franco arcillo- arenoso	0.17	Altiplanicie central
Tn	Toliman, franco	0.21	Altiplanicie central
Ac	Acasaguastlán, franco ar- cilloso	0.13	Altiplanicie central
Chx	Chixocol, franco limoso	0.13	Altiplanicie central
Gt	Guatemala, franco arcillo- so	0.15	Altiplanicie central
Chn	Chinautla, franco	0.15	Altiplanicie central
Chg	Chol, franco arenoso fino gravoso	0.17	Altiplanicie central
Ci	Cirija, franco limoso	0.20	Altiplanicie central
Sn	Sholonimá arcilla	0.16	Altiplanicie central
Sub	Subinal arcilla	0.20	Altiplanicie central
Chi	Chipó franco	0.25	Declive del Pacífico
PL	Palín, franco arenoso roco- so	0.09	Declive del Pacífico
AL	Alotenango	0.09	Declive del Pacífico

Fuente: OEA (1972)

Según Boyoucos citado por Rocha, (1977) la erodabilidad de los suelos es directamente proporcional a los porcentajes de arena más limo, e inversamente proporcional a los porcentaje de arcilla. Matemáticamente esta relación es:

$$\text{Erodabilidad} = \frac{(\% \text{arena} + \% \text{limo})}{\% \text{arcilla}}$$

Según Herrera citado por Cabrera (1986), la subcuenca se encuentra ubicada en la provincia fisiográfica Tierras altas volcánicas, que abarca los grandes paisajes: Montañas altas de Sumpango, Milpas Altas y Valle de Panchoy. El primer gran paisaje reúne tres paisajes: Colinas Bajas erosionadas (61% del área), Altiplanicie de Milpas Altas (24.7%) y Terrazas Erosionadas. El segundo presenta sólo el paisaje Abanico del Pensativo (4.7%).

2.2.1. Problemas de sedimentación e inundaciones en la parte baja de la subcuenca

López Choc (1988), indica que los problemas de sedimentación e inundación en la parte baja de la subcuenca se deben a la canalización del río alrededor de la ciudad, la cual disminuyó la pendiente del cauce hasta la confluencia con el río Guacalate, y que el diseño hidráulico del canal favorece la pérdida de la velocidad en la entrada de la ciudad, lo que causa una elevación del nivel de agua, aumentando el peligro de inundaciones.

El mismo autor indica que las zonas impermeables en la cuenca no tienen importancia en la formación de escorrentía superficial durante las crecidas, pero probablemente estas mismas áreas, si tengan importancia en la producción de sedimento. Por otra parte, sugiere que el área agrícola tiene importancia tanto en la formación de escorrentía como

en contribuir significativamente a la producción de sedimento, debido a la superficie cultivada, a las características de los suelo y a las prácticas agrícolas.

Cabrera, (1986) al utilizar el índice de Fournier calculó que la cuenca posee una degradación potencial anual de 64,000 toneladas métricas (2,100 tm/km²/año).

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, se pueden visualizar claramente los problemas que se originan del inadecuado manejo de la subcuenca. Por un lado hay problemas de inundaciones y sedimentación en la parte baja de la ciudad causando daños materiales y generando costos de mantenimiento. Por otra parte existen problemas de pérdida de suelo, causa entre otros factores de la baja productividad de los cultivos.

2.2.2. Limitaciones de la USLE

Rohdenburg citado por Bork H.R. (1991), considera que la USLE es un modelo empírico sencillo que requiere de poca información para utilizarlo y que a menudo dicha información es fácil de obtener en mapas topográficos y de suelo. Es un modelo muy popular y ampliamente utilizado. Sin embargo, los parámetros incluidos en éste modelo empírico no pueden ser extrapolados, por lo que se tiene que determinar la información para todas las condiciones de un agroecosistema.

Alfaro S. y Palacios A. (1991), aplicando la ecuación universal de pérdida de suelo y observaciones de campo para evaluar el proceso de erosión en la microcuenca quebrada Pital, en Puriscal, Costa Rica, encontraron que en la mayoría de las áreas donde el trabajo de campo demostró un proceso erosivo muy avanzado, no correspondía a las áreas

que según la ecuación universal de pérdida de suelo tienen una tasa de pérdida de suelo muy alta. Los autores atribuyen esta discrepancia a que el modelo utilizado, fue desarrollado y calibrado para otras condiciones de clima, pendiente, topografía, suelo, manejo y uso de suelo, diferentes a las condiciones del área de estudio.

Mientras que otros autores Vahrson W. G. y Cervantes C. (1991), han criticado a la ecuación universal de pérdida de suelo por sobre estimar las tasas de pérdida de suelo al hacer comparaciones con mediciones directas en parcelas de escorrentía. Sin embargo, el modelo puede utilizarse para identificar áreas críticas susceptibles al proceso de la erosión hídrica.

2.2.3. Descripción del modelo USLE

El modelo de la Ecuación universal de pérdida de suelo (USLE), ha permitido estimar las pérdidas por efecto de la erosión hídrica tipo laminar en diferentes partes del mundo, dada la facilidad de su aplicación.

A continuación se describe brevemente la (USLE), según Wishmeiyer y Smith (1978).

Esta ecuación es función de los siguientes factores: Características de la lluvia y del suelo, longitud y porcentaje de pendiente, cobertura vegetal (factor de cultivo) y del factor de prácticas de conservación de suelo.

La ecuación de pérdida de suelo esta definida por:

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

DONDE:

A: Es la cantidad estimada de pérdidas de suelo por unidad de superficie, expresada en las unidades seleccionadas para el factor K y para el período seleccionado del factor R. Generalmente A está dado en toneladas por acre por año, para convertir esta cantidad a ton/ha/año basta multiplicar el valor de A por 2.242

R: Factor de erosividad de las lluvias

K: Factor de erodabilidad del suelo

L: Factor de longitud de pendiente

S: Factor de pendiente

C: Factor de cobertura

P: Factor de prácticas de conservación de suelo

2.2.4. Erosividad de las lluvias (factor R)

El valor numérico usado para el factor R en la ecuación universal de pérdida de suelo, debe de cuantificarse del efecto que causa el impacto de las gotas de lluvia y también debe proveer información relativa a la cantidad y tasa de escorrentía como para ser asociada con la lluvia.

Cuando los factores de la ecuación universal de pérdida de suelo se mantienen constantes, las pérdidas de suelo en los campos de cultivo son directamente proporcionales al parámetro de la tormenta (aguacero), identificado como EI. La suma de valores de EI para diferentes tormentas en un período dado, representa una medida numérica del potencial erosivo de la lluvia para tal período. El promedio anual total de los valores de EI para diferentes tormentas en una localidad particular, representa el índice de erosividad de la lluvia para tal lugar.

Las lluvias menores de media pulgada (12.7 mm) y separadas con un intervalo de tiempo de seis horas, pueden omitirse para el cálculo del Índice de Erosión (IE).

2.2.5. Parámetro Energía-Intensidad (EI).

Por definición, los valores de EI para una tormenta dada, es igual al producto, de la energía total (E), tantas veces se presente la máxima intensidad en 30 minutos (I_{30}), donde la cantidad de E (energía) esta expresado en cientos toneladas-pies por acre e E_1 en pulgadas por hora.

La energía de la lluvia por si misma, no es un buen indicador del potencial erosivo, ya que la energía de una tormenta simplemente indica el volumen de lluvia y escorrentía que cae en un área determinada. Así, por ejemplo, una lluvia prolongada con poca intensidad puede tener la misma energía que una lluvia corta con alta intensidad.

Las gotas de lluvia aumentan la erosión con la intensidad. El término EI, es una interacción estadística que refleja como la energía total y el pico de intensidad son combinadas en cada tormenta particular. La energía de una tormenta es función de la cantidad de lluvia y de todas las intensidades que compongan dicha tormenta. El tamaño promedio de las gotas de lluvia se incrementan con la intensidad y, la velocidad final de las gotas de agua aumenta con el tamaño de las gotas. Dado que la energía de una masa dada en movimiento es proporcional al cuadrado de la velocidad, la energía de la lluvia tiene relación directa con la intensidad de la lluvia. La relación es expresada con la siguiente ecuación:

$$E = 916 + 331 \log_{10} I$$

Donde:

E es la energía cinética en pies/toneladas por acre/pulgada e I es la intensidad en pulgadas por hora. En el límite de 3"/hora, se considera que el tamaño promedio de las gotas de agua ya no aumenta cuando la intensidad excede a las 3"/hora.

La ecuación en unidades del sistema internacional es:

$$e = 451 + 331 \log_{10}(i_m)$$

$$e_m = 0.119 + 0.0873 \log_{10}(i_m)$$

$$i_m \leq 76 \text{ mm/hr}$$

$$e_m = 0.283$$

$$i_m > 76 \text{ mm/hr}$$

Donde:

e_m: Unidades de Megajoule por hectárea por milímetro de lluvia (MJ/ha.mm).

i_m: Intensidad máxima en mm/hr.

2.2.6. Erodabilidad del suelo (Factor K)

El significado del término "Erodabilidad del suelo" difiere del término "erosión del suelo". La tasa de erosión del suelo (A), en la ecuación de pérdida de suelo, puede ser influenciado más por la pendiente del suelo, longitud de pendiente, las características de la lluvia, cobertura, y el manejo del cultivo, que por las propiedades inherentes al suelo. Sin embargo un determinado tipo de suelo puede erodarse más fácilmente que otro, cuando todos los factores se mantienen constantes. Estas diferencias causadas por las propiedades del suelo mismo se refieren a la erodabilidad del suelo.

El factor erodabilidad del suelo, o factor K en la USLE, es un valor cuantitativo determinado experimentalmente. Para un suelo particular, es la tasa de suelo perdido por índice de erosión medido en una parcela estándar (72.6 pies de largo ó 22.13 mts y pendiente del 9%)

O sea el factor de erodabilidad del suelo, es la tasa de suelo perdido por unidad de R o EI para un suelo específico medido en una parcela estándar.

Por lo tanto, K tiene unidades de masa por unidad de área y unidad de erosividad. El valor de K en unidades internacionales, es aproximadamente 0.1317 veces el valor de K en unidades del sistema inglés. Un máximo valor de K sería del orden de 0.10 (t.ha.h/ha.MJ.mm)

El factor K se calcula mediante la siguiente relación:

$$100K = 2.1M^{1-14}(10^{-4})(12-a)+3.25(b-2)+2.5(c-3)$$

donde:

M: (% de limo + % arena muy fina) (100 - % arcilla)

Se considera limo las partículas de 0.05 a 0.002 mm y de 0.1 a 0.05 mm para las partículas de arena muy fina.

a: % de materia orgánica

b: Códigos de estructura del suelo, usados en las siguiente clasificación

1. Estructura granular muy fina
2. Estructura granular fina

3. Estructura granular media a gruesa
4. Estructura en bloques, laminar o masiva

c: Clase de permeabilidad del perfil del suelo

Lenta:

1. Muy lenta < 0.13 cm/h
2. Lenta de 0.13 a 0.51 cm/h

Moderada:

3. Moderadamente lenta de 0.51 a 2.00 cm/h
4. Moderada de 2.00 a 6.3 cm/h
5. Moderadamente rápida de 6.3 a 12.7

Rápida:

6. Rápida de 12.7 a 25.4 cm/h
7. Muy rápida > 25.4 cm/h

2.2.7. Factor Topográfico (LS)

Tanto la longitud como el grado de pendiente del suelo afectan significativamente la tasa de erosión hídrica. En la ecuación universal de pérdida de suelo, se consideran como un sólo factor para efectos de cálculo.

La ecuación que proporciona el peso del factor LS es:

$$LS = (\tau/72.6 \text{ pies})^m (65.41 (\text{sen } \alpha)^2 + 4.56 \text{ sen } \alpha + 0.065)$$

Donde:

τ : Es la longitud de la pendiente en pies

α : Es el ángulo de la pendiente en grados; y
 m : 0.5 si el porcentaje de pendiente es 5 o más; 0.4 para pendientes de 3.5-4%; de 0.3 para pendientes de 1-3%, y 0.2 en pendientes uniformes menores del 1%.

En el sistema internacional, la ecuación es:

$$LS = (\tau/22.13\text{mt.})^m (65.41 (\text{sen } \alpha)^2 + 4.56 \text{sen } \alpha + 0.065)$$

Donde:

τ : Longitud de la pendiente en metros
 α : ángulo de la pendiente en grados; y
 m : Igual que en la ecuación anterior

En realidad tal conversión no es necesaria ya que en ambos casos el resultado es adimensional.

2.2.8. Factor de cobertura (C)

El factor C se obtiene de la relación de la cantidad de suelo perdido bajo un determinado cultivo y la pérdida de suelo en áreas desnudas, labrada en dirección paralela a la pendiente. Este factor mide las combinaciones de los efectos de todas las interrelaciones de las variables cobertura y manejo.

Las pérdidas que pueden ocurrir en un campo particular, en el cual no hay cobertura, puede calcularse mediante el producto de los factores RKLS de la ecuación universal de pérdida de suelo. Así las pérdidas en suelo bajo cultivo serán menores que las pérdidas de suelo en áreas desnudas. Este factor depende de las combinaciones de cobertura, (estado particular del cultivo, crecimiento, y el desarrollo

de la cobertura, en el período de lluvia), y prácticas de manejo del cultivo.

El modelo divide el ciclo del cultivo en los siguientes períodos:

Período F: desde la labranza primaria a la labranza secundaria.

Período SB: (siembra) desde la labranza secundaria hasta que el cultivo ha desarrollado un 10% de su cobertura.

Período 1: desde que el cultivo ha desarrollado de un 10% hasta un 50% de su cobertura.

Período 2: (desarrollo del cultivo), desde que el cultivo ha desarrollado de un 50 a un 75% de su cobertura.

Período 3: (cultivo maduro), desde el final del período 2 a la cosecha.

Período 4: de la cosecha a la labranza primaria.

2.2.9. Factor de prácticas de conservación (P)

Por definición 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 y las pérdidas de suelo que ocurren en la misma área sin prácticas de conservación.

2.3. Descripción del modelo para estimar la tolerancia

El modelo matemático, fue el propuesto por Stamey y Smith adaptado por Skidmore (1982), el cual es:

$$T(x,y,t) = (T_1 + T_2)/2 - ((T_2 - T_1)/2) * \cos(\pi(z - z_1)/(z_2 - z_1))$$

donde: '

$T(x,y,t)$: Tolerancia de pérdida de suelo en un punto (x,y) en mm/año.

$(T_2 - T_1)/2$: Amplitud.

$(z - z_1)/(z_2 - z_1)$: representa el período del argumento coseno y el rango es de 0 a π radianes ó 180 grados, para los valores de z entre los límites de z_1 y z_2 .

T_1 : Tasa mínima de cambio permisible del suelo en el punto (x,y) (representa pérdidas de suelo por año expresado en mm/año).

T_2 : tasa máxima permisible de pérdida de suelo en el punto (x,y) , y al igual que T_1 representa pérdidas de suelo por año expresado en mm/año.

z : profundidad del suelo en m.

z_1 : profundidad mínima permisible en el punto (x,y) , para el desarrollo de cultivos en m.

z_2 : profundidad óptima, del suelo en el punto (x,y) , para el desarrollo de cultivos en m.

2.4. Aplicaciones de los sistemas de información geográfico

González M. (1991), en la revisión que hace a la ecuación universal de pérdida de suelo, indica que la utilización de sistemas de información geográfico facilita enormemente el cálculo del factor topográfico LS de dicha ecuación.

En Costa Rica, Oreamuno R. y Saborio J. (1990), elaboraron el mapa de erosión de la cuenca del río Virilla haciendo uso de la USLE, y el sistema ERDAS (Earth Resources Data Analysis System), como una herramienta de automatización de la información. Para automatizar el proceso aplicaron los programas disponibles del sistema ERDAS, indicando que las salidas deseables son mapas sencillos y combinados, así como matrices que dan la posibilidad de clasificar las unidades cartográficas obtenidas.

Los mapas básicos de los factores RKLS y C de la USLE, fueron previamente digitados y con esto se creó: a) el mapa de suelo (factor K) b) el mapa de relieve (factor LS) y, c) Mapa de capacidad de uso del suelo (factor C).

Agregan que el factor R no lo calcularon debido a que es un único valor para toda la cuenca, mientras que para el factor P asumieron el valor de 1 dado que en la cuenca no se consideran las prácticas de conservación.

Usando la función de sobreposición básico del sistema ERDAS, sobrepusieron automáticamente los mapas y posteriormente clasificaron los resultados en cuatro clases de rangos de erosión.

Mediante la imagen Landsat del 6 de febrero del 1986, realizaron un nuevo mapa del uso de la tierra (Factor C), para hacer una comparación y actualización del mapa que se había realizado anteriormente.

Las conclusiones de la investigación son:

- a) Con el sistema automatizado se tiene un ahorro del 50% del tiempo que se requiere para hacerlo manual.
- b) Se disminuye la exactitud por la generalización en cuatro clases ya que el SIG de ERDAS no permite la multiplicación de los valores sino que hay que efectuar la multiplicación de las clases informales.
- c) El trabajar con imágenes de satélite actualizadas, permite un aumento de la subdivisión de clases y una mejor información que se traduce en mejores resultados del modelo.

Bolaños A, y Fallas (1991) evaluaron el riesgo de erosión potencial en la cuenca del río Blanco, Guanacaste, Costa Rica utilizando IDRISI y el sistema IUM. Con esta metodología obtuvieron índices de Fournier, que expresa el potencial erosivo en áreas con susceptibilidad a la erosión hídrica. Clasificando éstas áreas con índice de potencial erosivo medio y alto, grados de erosión sufrida en los suelos (nula, ligera y moderada) y una relación entre las susceptibilidad del suelo y erosión sufrida, todo esto mostrado espacialmente en mapas respectivos. Entre sus conclusiones indican que es evidente la utilización de tecnología SIG, para el procesamiento de grandes y complejos volúmenes de información espacial, que permitan visualizar no sólo el estado actual de múltiples componentes del medio, tal y como el factor de erosividad de la lluvia, susceptibilidad a la erosión de suelo y la erosión sufrida por el suelo, sino además modelar nuevas combinaciones de

esos factores para obtener productos derivados tales como el índice potencial de erosión y la relación susceptibilidad/erosión actual.

La percepción remota es una extraordinaria herramienta para efectuar una gran variedad de investigaciones relacionada con el manejo de recursos naturales. Sin embargo, no siempre es el mejor medio por utilizar, por lo que Harman, D. *et al.* (1980) proponen considerar los siguientes aspectos de primera importancia para evaluar la conveniencia económica de su uso: grado de precisión deseado, uniformidad en los formatos de salida e informes, integridad de la base de datos, veracidad y capacidad del grupo humano para usar los equipos en los objetivos específicos de la investigación y para continuar desarrollando las metodologías, costos y efectividad de manejo. Los criterios para evaluar el uso de los métodos tradicionales vds. la percepción remota, pueden ser jerarquizados conforme a su importancia, de la siguiente manera:

- El ahorro en tiempo
- El ahorro en dinero
- La calidad del producto final
- El incremento en la eficiencia de la administración

Otro trabajo fue el realizado por Kapetsky, J. M., L. McGregor y H. Nanne, E. (1987) en Costa Rica, en el área del Golfo de Nicoya, utilizando para ello las técnicas de percepción remota y un sistema de información geográfico. El objetivo de la investigación fue evaluar las potencialidades de estas dos técnicas para proveer información rápida y sinóptica, que sirviera de base para formular un plan de desarrollo acuícola. Se utilizaron

imágenes TM-Landsat, las cuales fueron procesadas digitalmente y generaron de esta forma información que fue utilizada posteriormente en un SIG, junto con otro tipo de información gráfica, como cartas topográficas. También se utilizó información no espacial, de atributos relacionados con los recursos en estudio, así como datos socioeconómicos, oceanográficos, ecológicos y biológicos. Se evaluó con la ayuda de un SIG tres escenarios de desarrollo distintos para la acuicultura, uno de los cuales fue la acuicultura en superficies disponibles de las aguas y tierras. Los criterios de evaluación incluyeron aspectos como salinidad, infraestructura, calidad de agua para todo tipo de acuicultura, batimetría, refugio de vientos y mareas, seguridad para cultivos suspendidos, ubicación de lagunas salinas, disponibilidad de post-larvas para camaronería extensiva, capacidad de los suelo, distancia a que se encuentra agua dulce y salada y tipo de uso para cultivos camaroneros semi-intensivos.

Los resultados del estudio muestran claramente que tanto la teledetección como los SIG usados en forma conjunta proveen una información muy útil, que permite obtener información rápida de los sitios que se deben desestimar para un desarrollo acuícola, dando una pista segura de los recursos humanos y financieros hacia localidades que presenten aptitudes reales.

En México, Jensen, J., Kjerfve, E., Ramsey III, E. y Magill, C., Medeiros, C. y Sneed, J. (1989), diseñaron un modelo para explicar la salinidad y la distribución del sedimento suspendido en la Laguna de Términos. Para lograr ello, utilizaron dos metodologías: un modelo hidrodinámico tradicional y otro modelo obtenido a partir del procesamiento digital de dos imágenes TM-Landsat obtenidas

en dos fechas distintas. Los datos satelitales procesados mostraron tener una alta correlación con el modelo hidromórfico, para las dos fechas. Por comparaciones entre los TM (1.5 x 1.5 km), se pudo estimar la covarianza entre los mapas generados por uno y otro método, lo que fue un dato muy útil para identificar las áreas en donde los modelos diferían.

En Malasia, Pheng, K (1989) efectuó un análisis de los aspectos socioeconómicos de poblaciones establecidas cerca de ambientes costeros, con el fin de evaluar el grado de dependencia de éstas con los recursos costeros. Para el efecto, se utilizó un SIG-PC para introducirle información gráfica de una infinidad de fuentes distintas (MSS-Landsat, fotografías aéreas, cartas topográficas, etc), para luego efectuar superposiciones entre ellos, lo que permitió mejorar el análisis espacial. Al componente del sistema de administración de base de datos del SIG se le introdujeron un total de 84 variables socioeconómicas, incluyendo estadísticas de empleo y población, niveles de ingresos, formación educacional, infraestructura disponible y lugares de recreación públicos, entre otros. Estos datos fueron georeferenciados, es decir, relacionados, a una categoría específica, la cual a su vez puede ser localizada en un mapa. Con toda esta información cargada en el SIG, se intentó efectuar una delimitación de la zona costera basada en aspectos socioeconómicos y no en criterios físicos. Para ello, se crearon corredores de 1.3 y 5 km medidos desde la línea de costa. El mapa resultante fue sobrepuesto con el mapa de ubicación de poblados, determinando cuántas y cuáles de éstos caían dentro de los distintos corredores. De ésta forma, de un total de 84 poblados, determinados, 34 de ellos se localizaron en el interior del corredor de 1 km; 33 en el de 1-3 km; 14 en el corredor de 3-5 km; y sólo 3 fuera de

los 5 km. Se examinaron luego las características socioeconómicas de los poblados para los distintos corredores, evaluando el grado de dependencia de éstas con actividades de pesca, por ejemplo. Se demostró por ésta vía que la mayor parte de los poblados fuertemente concentrados con actividades de pesca, se encontraban concentrados en el corredor de 1 km.

En forma análoga al caso anterior, se evaluaron las características socioeconómicas de los poblados, en relación al acceso a la red de caminos y a las ciudades principales, lo que sirvió para evaluar el concepto de accesibilidad de cualquier lugar y para correlacionar este aspecto con el estado de desarrollo del lugar en cuestión.

Para efectuar los análisis descritos precedentemente, se crearon corredores circulares concéntricos de 1, 2, 3, 4, y 5 km. a partir de las ciudades más grandes, e igual cosa se hizo para el caso de los caminos. Para cada uno de éstos corredores generados, se evaluó el porcentaje de la población que tenía un cierto nivel educacional.

En forma paralela, se monitoreó también el uso de la tierra entre 1974 y 1986, demostrando que sólo el 40% del área original de manglares permanecía aún; que un 30% fue desforestada para cultivar palma aceitera y un 9% para transformarlas en pastos y matorrales.

Como se puede demostrar, el SIG es una herramienta muy potente para evaluar, tipificar, monitorear y simular resultados a partir de escenarios previamente definidos que apoyen a la toma de decisiones. Para efectuar análisis eficientes y útiles, es necesario hacer notar que un aspecto muy importante es el ingreso de información de buena

calidad, ya sea en forma gráfica o bien de sus atributos asociados. En este caso comentado, el SIG fue capaz también de identificar la existencia de conflictos reales y potenciales entre los distintos usos de la tierra por la ocupación del agua, lo que ilustra el potencial que presenta esta tecnología.

III. MATERIALES Y METODOS

3.1. Localización del área de estudio

La subcuenca del río Pensativo se localiza al noreste de la cuenca del río Achiguate. Las coordenadas geográficas son: $90^{\circ} 39'$ a $90^{\circ} 44'$ longitud oeste y $14^{\circ} 35'$ a $14^{\circ} 31'$ de latitud norte, respecto al meridiano de Greenwich (Figura 1). Limita al norte con el Cerro El Rejón, la cumbre de San Mateo, el Cerro Comunal y el Cerro La Libertad. Al este con el Cerro Santa Rosa, el poblado Santo Tomás Milpas Altas y Magdalena Milpas Altas. Al oeste con el Cerro El Narizón, la aldea El Hato, San Felipe de Jesús, el Cerro Manchén y la ciudad de Antigua Guatemala. Al sur con el Cerro Las Minas, Cerro Monterrico y el Cerro Cucurucho.

3.2. Recursos utilizados

Para llevar a cabo la presente investigación fue necesario de los siguientes recursos:

3.2.1. Cartográficos

Mapa topográfico escala 1:50,000 hoja número 20591

Mapa de suelo, unidades de tierra, escala 1:25,000 Rosal (1988)

Mapa de clases de pendientes, escala 1:25,000 Rosal (1988)

3.2.2. Fotogramétricos

Fotografías aéreas pancromáticas, tomadas en el año 1973. y 1980, escala de 1:30,000.

Fotografías aéreas del año 1991, escala 1:60,000.

Ampliación de fotografía aérea del año 1991, escala 1:20000.

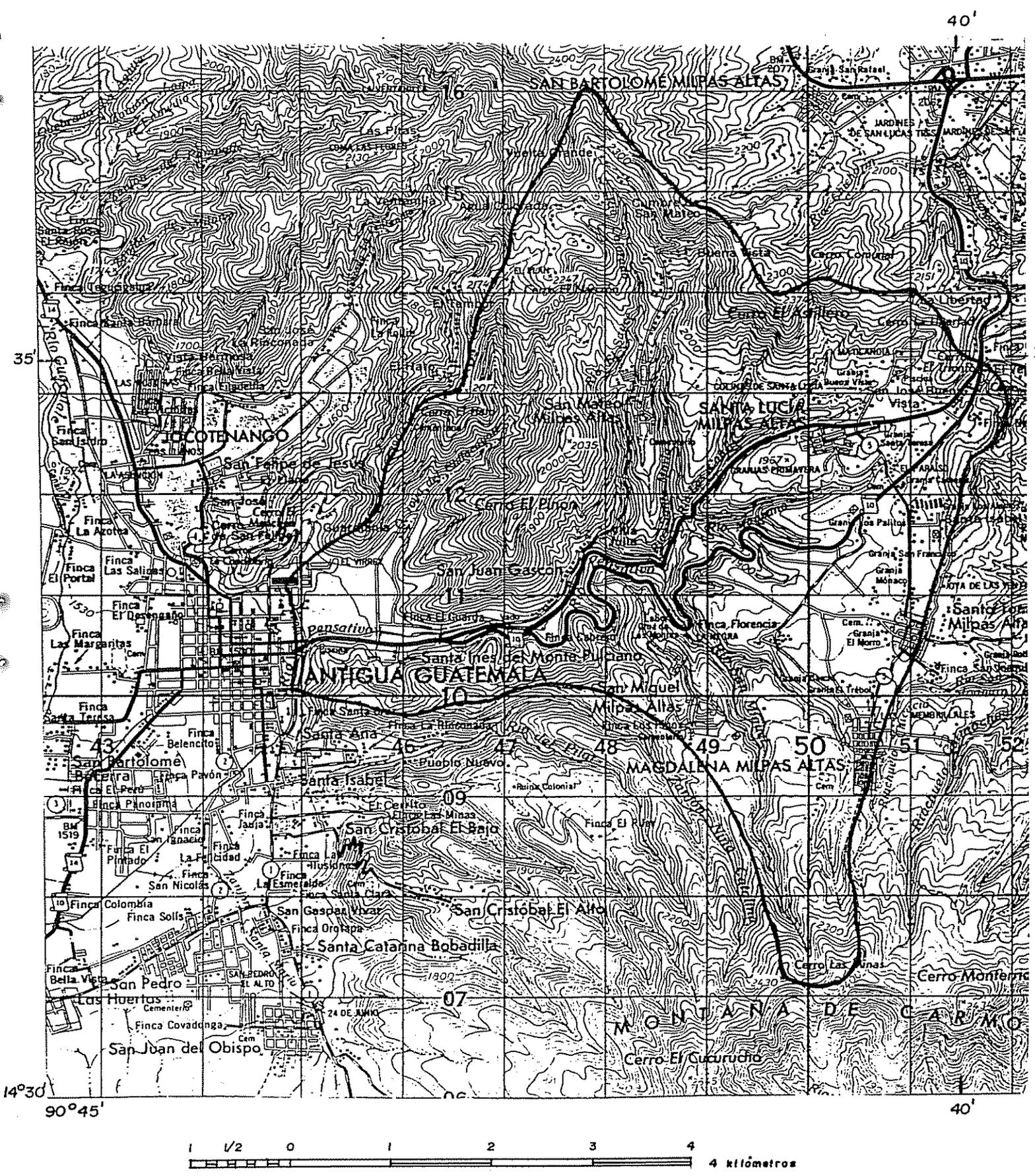


FIGURA 1: Localización de la subcuenca del río Pensativo.

3.2.3. Equipo

Equipo para la toma de muestras de suelo y lectura de perfiles de suelo, cilindros de acero inoxidable, recipientes para muestras de suelo, espátula y clinómetro
Azadón, machete.

Balanza analítica

Horno eléctrico

Equipo de cristalería

Tamiz número 200

Tamiz número 10

Estereoscópio de espejos

Aparato para transferir información de fotografías aéreas a mapas (transfer)

Permeámetro de carga constante

Microcomputadora con disco duro

Programas: ERDAS e IDRISI (paquetes SIG)

Mesa digitalizadora

3.2.4. Materiales

Reactivos, e insumos de laboratorio para determinar %MO y Textura.

Etiquetas de identificación

Cintas para conexión eléctrica

Papel filtro

Malla de nylon

Información de cuatro años de parcelas de escorrentía, instaladas por el (IIA) de la FAUSAC.

3.3. Determinación de los factores de la USLE a nivel de subcuenca.

En la presente investigación se utilizó la cuenca como unidad de estudio. A continuación se describe la metodología utilizada.

3.3.1. Factor de erosividad de la lluvia (R)

Se recopilaron los registros de diez estaciones meteorológicas que se encuentran ubicadas dentro y las más cercanas a la subcuenca. Con esta información se estimó un promedio de la precipitación para cada estación, así como precipitaciones para períodos de retorno de cinco y diez años.

La estimación de la precipitación para los períodos de retorno ya indicados, se hizo utilizando la ecuación de Chow:

$$P_t = PPA + k_t S$$

Donde:

P_t = precipitación para un período de retorno t

PPA = precipitación promedio anual en mm de lluvia/año

S = desviación estándar de los datos donde se obtuvo la media

k_t = $-0.7797 * (0.5772 + \text{Ln}(\text{Ln}(T/(T-1))))$

T = Período de retorno en años

Con los valores de precipitación media, para un período de retorno de cinco y diez de años por estación se estimó los valores correspondientes de erosividad de las lluvias mediante una de las ecuaciones generadas por Bravo (1988).

$$Y = -3945.68 + 7.95*PPA$$

$$r = 0.81$$

Donde:

Y: Índice de erosividad de las lluvias expresado en Mj.mm por ha.hora.año

PPA: Precipitación promedio anual, en mm

Con los valores de erosividad de la lluvia y las coordenadas correspondientes, se procedió a generar un área de isoerodentas delimitada por las mayores y menores coordenada (X,Y) de las siguientes estaciones pluviométricas: a) El Potrero, b) Santa María de Jesús, Guatemala sur, y c) La Suiza Contenta; utilizando el modulo **interpol** del programa IDRISI; luego dentro de esta área se enmarcó otra área más pequeña, (donde se ubica la subcuenca) esto utilizando el modulo **window** de IDRISI.

3.3.2. Factor erodabilidad del suelo (K)

Se utilizó, como base el mapa de suelo generado por Rosal (1988). Los puntos de muestreo se ubicaron al azar en cada tipo de suelo reportado. En total se tomaron 14 muestras de suelo a dos profundidades con dos repeticiones, para hacer un total de 56 submuestras a cada una de éstas submuestras se les determinó la estructura (a nivel de campo) y (a nivel de laboratorio) textura, porcentaje de arena muy fina, materia orgánica y conductividad hidráulica. (Cuadro 1A.)

Complementariamente se muestreó áreas de bosque para determinar estructura, %MO, textura, y % de arena muy fina.

- a) Determinaciones de conductividad hidráulica, textura, y materia orgánica en el laboratorio

Una vez ubicados los puntos de muestreo, se procedió a la recolección e identificación de muestras tanto en cilindros de metal inoxidable para obtener muestras de suelo inalterado para la determinación de la conductividad hidráulica, como la obtención de muestras alteradas en bolsas plásticas para determinar textura, arena muy fina y materia orgánica.

- b) Análisis en el laboratorio

En el laboratorio se tamizaron todas las muestras utilizando un tamiz (No.10), en el cual pasan partículas hasta de 2 mm de diámetro. Luego se pesaron 10 gr. de cada muestra de suelo secado al aire, introduciéndolo al horno a una temperatura de 105°C, durante 24 horas, para determinar el porcentaje de humedad de cada muestra.

La determinación del porcentaje de materia orgánica, se hizo de acuerdo con el Método de Black y Walkley modificado.

Conociendo los resultados del porcentaje de materia orgánica se procedió a tratar aquellas muestras de suelo que reportaban valores de más de 6% de materia orgánica. El tratamiento consistió en adicionar peróxido de hidrógeno (H_2O_2), dejando reposar la solución hasta no haber efervescencia, el procedimiento se repitió hasta que no hubo ebullición, para luego colocar los beakeres en una estufa a 70°C agregando otros 10 ml. de peróxido de hidrógeno, luego

se filtro el suelo utilizando agua destilada, para éstas muestra se determinó nuevamente el porcentaje de humedad.

Al eliminar la materia orgánica en algunas muestras, se procedió a realizar el análisis de textura, de las diferentes muestras, usando la metodología de Bouyocos.

Se peso 100 gr. de suelo secados al aire, dicho suelo fue depositado en un tamiz No. 200 (permite pasar partículas menores de 0.0029 pulgadas que equivalen a 0.07366 mm. o sea aproximadamente 0.05 mm), y agregando agua al tamiz se lavaron las partículas de limo y arcilla, dejando en el tamiz las partículas de arena muy fina.

Luego cada separado se colocó en el horno durante 24 horas a una temperatura de 105 grados centígrados. Con el peso de los separados y conocido el porcentaje de humedad del suelo secado al aire se calculó el porcentaje de arena muy fina.

La conductividad hidráulica se determinó, a dos profundidades para los diferentes tipos de suelo reportados, utilizando la metodología propuesta por Forsythe (1985), mediante un permeámetro de carga constante.

La ecuación utilizada para determinar la conductividad hidráulica fue:

$$\frac{Q}{At} = v = -K \frac{DH}{I}$$

Donde:

t: Tiempo

Q: Volumen del flujo

v: Velocidad [$\frac{L}{T}$];

- K: Conductividad hidráulica [$\frac{L}{T}$];
- H: Carga hidráulica o energía/unidad de peso del agua [L];
- l: Longitud de la columna de suelo [L];
- DH: Diferencia en la carga hidráulica [L];
- $\frac{DH}{I}$: Gradiente hidráulica [sin dimensiones]

Teniendo la información que requiere el modelo para calcular el factor de erodabilidad del suelo, se procedió a la aplicación del modelo utilizando un programa, elaborado por el departamento de Agricultura de Estados Unidos, también se puede utilizar el nomograma de Wischmeier y Smith (1978), presentado en la **Figura 2**. Los valores del factor de K en áreas bajo vegetación permanente se multiplicaron por un factor de corrección de 0.70 propuesto por Wischmeier y Smith (1978), esto por el elevado contenido de materia orgánica presente.

Para asignar el valor de K a cada tipo de suelo, se agrupó el uso de la tierra en dos categorías áreas con bajo y alto contenido de materia orgánica; para luego combinar este resultado con el mapa de suelo, que contiene seis categorías, resultando en doce posibles combinaciones (un mismo suelo con bajo y alto contenido de M.O). Luego se asignaron valores de K a cada suelo y el contenido de M.O; generando así un mapa correspondiente al factor K a cada suelo según contenido de M.O. para los años analizados.

3.3.3. Factor longitud (L)

Para determinar la longitud de pendiente, se adoptó el criterio de Arnoldus (1977), el cual indica que la longitud de la pendiente esta definida como la distancia desde un punto de origen del flujo de agua a cualquier otro punto que

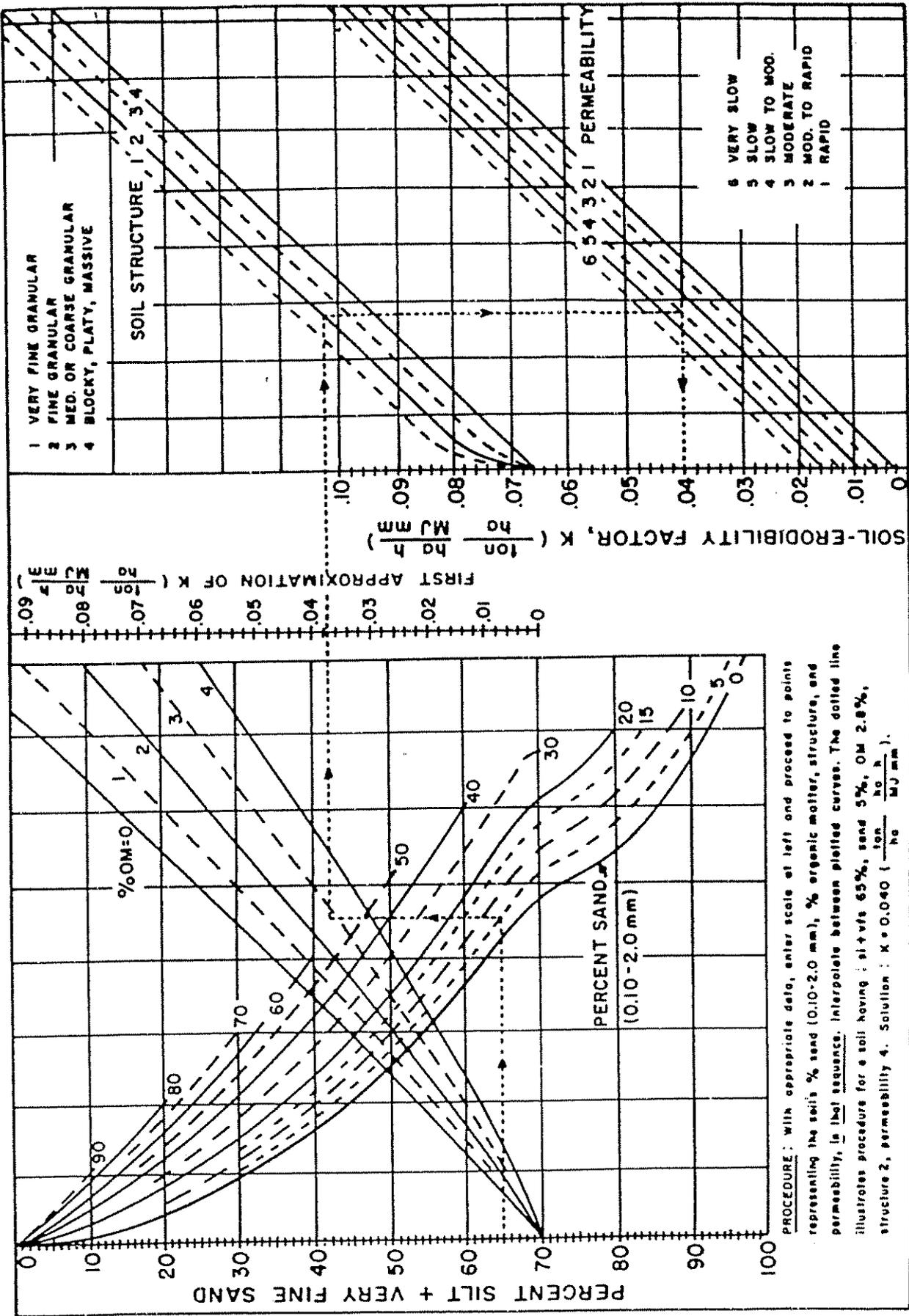


Figure 2. Soil erodibility (K) factor nomograph in SI units.

(Nomograma del factor de erodibilidad del suelo en unidades del sistema internacional).

Fuente: Foster et al (1981)

se determine como límite de un área. O sea, la longitud de pendiente está limitada por: a) el punto donde la pendiente decrece e inicia la deposición, ó b) el punto donde la escorrentía llega a un canal bien protegido lo cual puede ser una red de drenaje o un canal construido como una terraza.

Se delimitaron las microcuencas de la subcuenca del río Pensativo, luego dentro de cada microcuenca, se definieron unidades más pequeñas usando un mapa topográfico escala 1/50000.00, generando un mapa de unidades homogéneas en cuanto a pendiente y longitud y otro de la red de drenaje. Con éstos dos mapas, mediante el conteo de número de curvas de nivel entre la parte alta y el drenaje. Se obtuvo estos puntos para obtener un mapa de longitudes de pendiente para áreas bajo vegetación permanente.

Para las áreas bajo cultivos, el mapa de la red de drenaje, se sobrepuso al mapa de uso de la tierra, esto con la finalidad de medir la longitud de las pendientes en dirección al flujo de agua. Para esto se hicieron tres mediciones de distancia horizontal con un escalímetro sobre la fotografía aérea, luego sabiendo el porcentaje de pendiente se determinó las longitudes inclinadas, las cuales están determinadas por las distancias que hay entre las prácticas de conservación de suelo (acequias, acequias con barreras vivas, barreras vivas), y la longitud que presentan las parcelas en el campo.

Para la determinación de los factores S y L (factor topográfico) se utilizó la ecuación de Wischmeier y Smith (1978), modificada por McCool (1989), ya que con la ecuación propuesta por Wischmeier y Smith (1978) el peso de las pendientes para áreas de la subcuenca del río Pensativo

daba valores muy altos, que incidían en estimaciones fuera del rango de las pérdidas de suelo observadas durante cinco años en parcelas de escorrentía en la subcuenca.

La ecuación de McOOL et al (1989) para calcular el peso del factor L es:

$$L = (1/22.13)^m$$

donde:

$$m = B/(1+B)$$

L = Factor de longitud de pendiente.

- 1 Proyección horizontal de la longitud de la ladera (no la longitud de la ladera paralela al terreno), y B es un coeficiente que puede evaluarse según la siguiente expresión de McOOL (1989):

$$B = (\text{seno } \alpha / 0.0896) / (3.0 (\text{seno } \alpha)^{0.08} + 0.56)$$

y α es el ángulo de la pendiente en grados.

En el Cuadro 2A. se muestra algunos valores de los coeficientes de b para el cálculo de m.

Debido a que inicialmente los valores de las longitudes se digitaron considerando una proyección paralela al terreno, fue necesario transformar estas proyecciones a longitudes en proyección horizontal de la pendiente, aplicando la función coseno a los ángulos del mapa de pendientes. Este resultado multiplicado por el mapa de longitudes en proyección paralela a la pendiente, dio como resultado el mapa de longitudes con proyección horizontal.

Este mapa se dividió entre el valor de 22.13 m (longitud de la parcela standard de Wischmeier). También se generó un mapa de exponentes. En el Cuadro 2. se pueden apreciar los valores de los exponentes utilizados. Las ecuaciones utilizadas fueron las de McCool *et al* (1989).

Cuadro 2. Valores del coeficiente m para la obtención del factor LS.

Rango de Pendientes	Marca de Clase de las pendientes	Coeficiente m
0-8	4.00	0.36
8-16	12.00	0.55
16-20	18.00	0.60
20-30	25.00	0.64
30-40	35.00	0.67
40-50	45.00	0.69
50-60	55.00	0.70
>60	65.00	0.71

Fuente: ecuación de McCool *et al* (1989).

Finalmente el mapa de proyecciones horizontales dividido por 22.13 se elevó al mapa de exponentes dando como resultado los valores del factor L, todo esto utilizando algunos módulos de IDRISI.

3.3.4. Factor pendiente (S)

Se tomó como base el mapa generado por Rosal (1988), el cual presenta rangos de 0-8, 8-16, 16-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, y mayor del 60% de pendiente. A cada uno de estos rangos se le asignó un valor numérico equivalente al resultado de aplicar la ecuación de McCool *et al* (1989), a la marca de clase de cada rango.

La expresión propuesta es:

$$S = 10.8 \text{ seno } \alpha + 0.03 \text{ si } S < 9\%$$

$$S = 16.8 \text{ seno } \alpha - 0.50 \text{ si } S \geq 9\%$$

3.3.5. Factor Cobertura-Prácticas de conservación (CP)

Para determinar los valores de los factores CP, se utilizaron los registros de datos de cuatro años de pérdida de suelo ocurridas en el cultivo de maíz y frijol bajo cuatro tratamientos de prácticas de conservación de suelo en parcelas de escorrentía, ubicadas dentro de la subcuenca y conducido por el Instituto de Investigaciones Agronómicas de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos, de Guatemala.

El procedimiento consistió en dividir los valores de las pérdidas de suelo observadas entre el valor de RKLS obtenidos con el procedimiento de Wischmeier y Smith (1978).

3.3.6. Factor de cobertura y práctica (C y P)

Se procedió a la fotointerpretación, de tres juegos de fotografía aérea, que corresponden a los años 1973, 1980, y 1991, con lo que se obtuvo el uso de la tierra para los años antes indicados, procediéndose a transferir la información de las fotografías aéreas a mapas respectivos. Para el juego de fotos del año 1991 se realizó una ampliación de la fotografía aérea, (E: 1/20000) ya que la escala disponible era baja, luego se hizo un chequeo de campo.

Se fotoidentificaron las prácticas de conservación de suelo para los tres juegos de mapas, luego dicha información fue transferida a mapas específicos. Para los años 1980 y

1973 se consultó con personas de avanzada edad y así verificar la existencia de dichas obras de conservación de suelo y aguas.

Luego al tener la ubicación de la diferentes prácticas y con los registros de datos de las parcelas de escorrentía, se estimó un valor promedio de protección para cada una de las prácticas de conservación de suelo y aguas. El procedimiento para éste último consistió en dividir el factor CP entre un valor C promedio obtenido de la consultas a expertos en conservación de suelo.

Para los valores de C correspondientes correspondiente a otros usos de la tierra (forestal, cultivos permanentes, pastos), se utilizaron los reportados en la literatura.

En el presente estudio se supuso que el efecto de cada una de las cuatro prácticas de conservación evaluadas asociadas al cultivo de frijol es similar cuando dichas prácticas se encuentran asociadas a cultivos de hortalizas, y que el promedio de los valores de las diferentes prácticas bajo los cultivos de maíz y frijol son equivalentes cuando dichas prácticas se encuentran bajo la asociación de los cultivos maíz con hortalizas.

3.4. Determinación de la pérdida tolerable en cada tipo de suelo

El modelo matemático utilizado fue el propuesto por Stamey y Smith adaptado por Skidmore, (1982).

Se obtuvo el mapa de profundidad del suelo sobreponiendo el mapa de unidades de tierra y el mapa de

suelos generados por Rosal, (1988) y la descripción del perfil (profundidad efectiva).

En este caso se consideró que la profundidad óptima (z_2), y profundidad mínima permisible (z_1) para el desarrollo de cultivos es de 0.90 y 0.30 metros respectivamente.

La tasa de regeneración, y tasa máxima permisible del suelo utilizada en el modelo fueron de 0.20 mm/año y 1.1 mm/año, obtenidas de Kirkby (1984), y de Wischmeier (1978), respectivamente.

Teniendo los valores de tolerancia se procedió a asignar a cada tipo de suelo un valor de acuerdo con la profundidad efectiva. El Cuadro 3. muestra los valores de tolerancia.

Cuadro 3. Valores de tolerancia en mm/año según profundidad efectiva de suelo.

Tipo de Suelo	Profundidad en m.	Tolerancia en mm/año	Categoría.	Superficie en km ² .	Porcentaje.
Asociación	0.31	0.200	1	14.6466	49.71
M. Vitrandepts.	0.31	0.200	1	0.0801	0.27
T. Vitrandepts.	0.51	0.450	2	1.3032	4.42
T. Ustropets.	0.51	0.450	2	1.6272	5.22
T. Eutrandepts.	0.52	0.450	2	3.1932	10.84
F. Ustipsamments.	0.75	0.950	3	0.0846	5.22
M. Vitrandepts.	0.90	1.100	4	1.0152	3.45
T. Eutrandepts.	0.90	1.100	4	7.3368	24.90
F. Ustipsamments.	0.90	1.100	4	0.0513	0.10
T. Ustropepts.	0.90	1.100	4	0.1269	0.13
TOTAL.....				29.4651	100.00

3.5. Cuantificación espacial de las pérdidas de suelo en los años 1973, 1980, 1992 y modelando la práctica barrera viva con acequia a un distanciamiento de 30 metros

Para cuantificar las pérdidas de suelo se multiplicaron linealmente los seis mapas correspondientes a cada uno de los factores de la USLE ($R*K*L*S*C*P$), esto para cada año, generando un mapa por año con valores de pérdida de suelo expresado en ton/ha/año. Para el año 1992 se repitió el procedimiento ya indicado, con la única diferencia de utilizar el factor R con período de retorno de cinco y diez años.

En el caso de la modelación se asignaron valores del factor P, de la práctica de conservación de menor costo y más rentable, (barrera viva de zacatón, *Panicum maximum*), reportada por Hernández López (1990), Pineda C. (1991) y Chan (1992), para los cultivos de maíz y frijol.

El distanciamiento entre barreras vivas, para modelar ésta práctica fue de 30 metros, valor correspondiente a longitud de la pendiente. Esto para aquellas áreas que se encuentran actualmente bajo la práctica tradicional.

3.6. Cuantificación e identificación de áreas con diferentes rangos de erosión en los años 1973, 1980 y 1992

Se hizo una reclasificación de las áreas del mapa de erosión indicado en el inciso anterior formando un nuevo mapa con cinco categorías.

Los rangos de erosión para las primeras cuatro categorías fueron definidas por los niveles de tolerancia y

la quinta fue definida con valores mayores al nivel de tolerancia más alto, esto con la finalidad de hacer comparaciones con los niveles de tolerancia.

En el Cuadro 4 se muestran los rangos que se utilizaron para la clasificación de erosión y la categoría asignada.

Cuadro 4. Clasificación de la erosión en rangos.

Rango en ton/ha	Categoría
0.00-2.00	1
2.00-4.50	2
4.50-9.50	3
9.50-11.00	4
> de 11.00	5

3.7. Cuantificación e identificación de áreas cuya erosión excede a los niveles de tolerancia

Se procedió a realizar una tabla cruzada (crosstab) entre el mapa de tolerancia que tiene cuatro categorías y el mapa de rangos de erosión que tiene cinco categorías. Se reclasificó el resultado, para discriminar los tres casos posibles: a) áreas con erosión igual a la tolerancia, b) áreas con erosión mayor a la tolerancia y finalmente c) áreas con mayor grado de erosión que la tolerancia.

En el Cuadro 5 se muestran las categorías asignadas en la reclasificación del mapa que muestra los atributos de erosión y tolerancia.

Cuadro 5. Categorías asignadas según niveles de erosión y tolerancia permisible.

Atributos presentes	Categoría asignada
Erosión = Tolerancia (E=T)	1
Erosión < Tolerancia (E<T)	2
Erosión > Tolerancia (E>T)	3

3.8. Cuantificación e identificación de los tipos de suelo con niveles de erosión mayores a la tolerancia, en los años 1973, 1980 y 1992

Combinando el mapa anterior y el mapa de profundidad efectiva del suelo, se generó el mapa de áreas que exceden el nivel de erosión, según tipo y profundidad efectiva de suelo. El Cuadro 6 se muestran los atributos y categorías, presentes en el mapa respectivo.

El modelo de la USLE no considera los procesos de deposición ni la erosión que originan áreas expuestas como cortes de carreteras, caminos los cuales son aportadores importantes de sedimento, principalmente por carecer de cobertura vegetal.

3.9. Estimación de Costos

Para estimar los costos que se requieren para implantar la práctica de conservación de suelo barreras vivas, en el área se consideró, el análisis económico realizado por Rosado P. Barrientos y Lima L. (1992), asumiendo un 50% de los costos que dichos autores reportan para la práctica de acequia con barrera viva.

Mediante el módulo Area de IDRISI, se cuantificaron las áreas que actualmente no tienen prácticas de conservación de

suelo. El costo por hectárea para implantar la práctica de conservación de suelos, se multiplicó por el número de hectáreas lo que dio como resultado un costo global aproximado requerido para rehabilitar áreas que son importantes en la producción de sedimento.

Por otra parte también se hizo una estimación de los costos, que implican la remoción de sedimento en la parte baja de la subcuenca. Para el efecto, se procedió a observar el tiempo empleado por una maquinaria pesada para remover un determinado volumen de sedimento. De esta forma se pudo establecer el tiempo aproximado que se requiere anualmente para remover el sedimento.

Cuadro 6. Categorías asignadas a suelos cuyo nivel de erosión excede al nivel de tolerancia permisible.

Tipo de suelo	Prof. efectiva en m.	Categoría
T. Eutrandepts.	0.90	1
T. Eutrandepts.	0.51	2
T. Ustropepts.	0.90	3
T. Ustropets.	0.51	4
T. Vitrandepts.	0.51	5
M. Vitrandepts.	0.90	6
M. Vitrandepts.	0.31	7
F. Ustipsaments.	0.90	8
F. Ustipsamments.	0.75	9
Asociación *	0.31	10
Varios sin problema	varios	11

* Entic eutrandepts-Litic ustorthents

Con el tiempo establecido anteriormente y el precio que cobraría una firma privada para remover y transportar el sedimento se pudo establecer el costo total anual por concepto de remoción de sedimento.

Al hacer la modelación se determinó la cantidad de sedimento que, teóricamente, reduciría la práctica barrera viva.

3.10. Modelo cartográfico aplicado a un sistema de información geográfico

Se digitó la información básica, consistente en mapas de uso de la tierra, clases y longitudes de pendientes, profundidad efectiva de suelo, prácticas de conservación de suelo, índice de erosividad medio de las lluvias y para períodos de retorno de cinco y diez años. Aplicando el sistema ERDAS mediante el comando DIGPOL para la creación de archivos tipo SIG, los que posteriormente fueron transformados en archivos vectoriales y éstos últimos en archivos tipo raster para hacer las aplicaciones mediante el programa de IDRISI.

En la Figura 3. se muestra un esquema general de las aplicaciones para llegar a obtener resultados de acuerdo con los objetivos.

3.11. Variables analizadas a nivel de parcelas de escorrentía

Se recopiló la información de las variables (sedimento, escorrentía y rendimiento) medidas en la evaluación de cuatro prácticas de conservación de suelo en las parcelas de escorrentía instaladas por el IIA, de la FAUSAC. Luego con estos registros, se hizo una base de datos que contiene la información de las diferentes variables continuas y clasificatorias. El Cuadro 3A del apéndice, muestra, los registros utilizados. Después hicieron los análisis de varianza necesarios para determinar el efecto de cuatro practicas de conservación sobre las variables ya indicadas así como para las variables generadas carga sólida específica (sedimento/escorrentía) y CP (sedimento/RKLS).

Figura 3. Modelo cartográfico para evaluar el proceso de erosión hídrica utilizando la USLE y un sistema de información geográfico, en la subcuenca del río Pensativo.

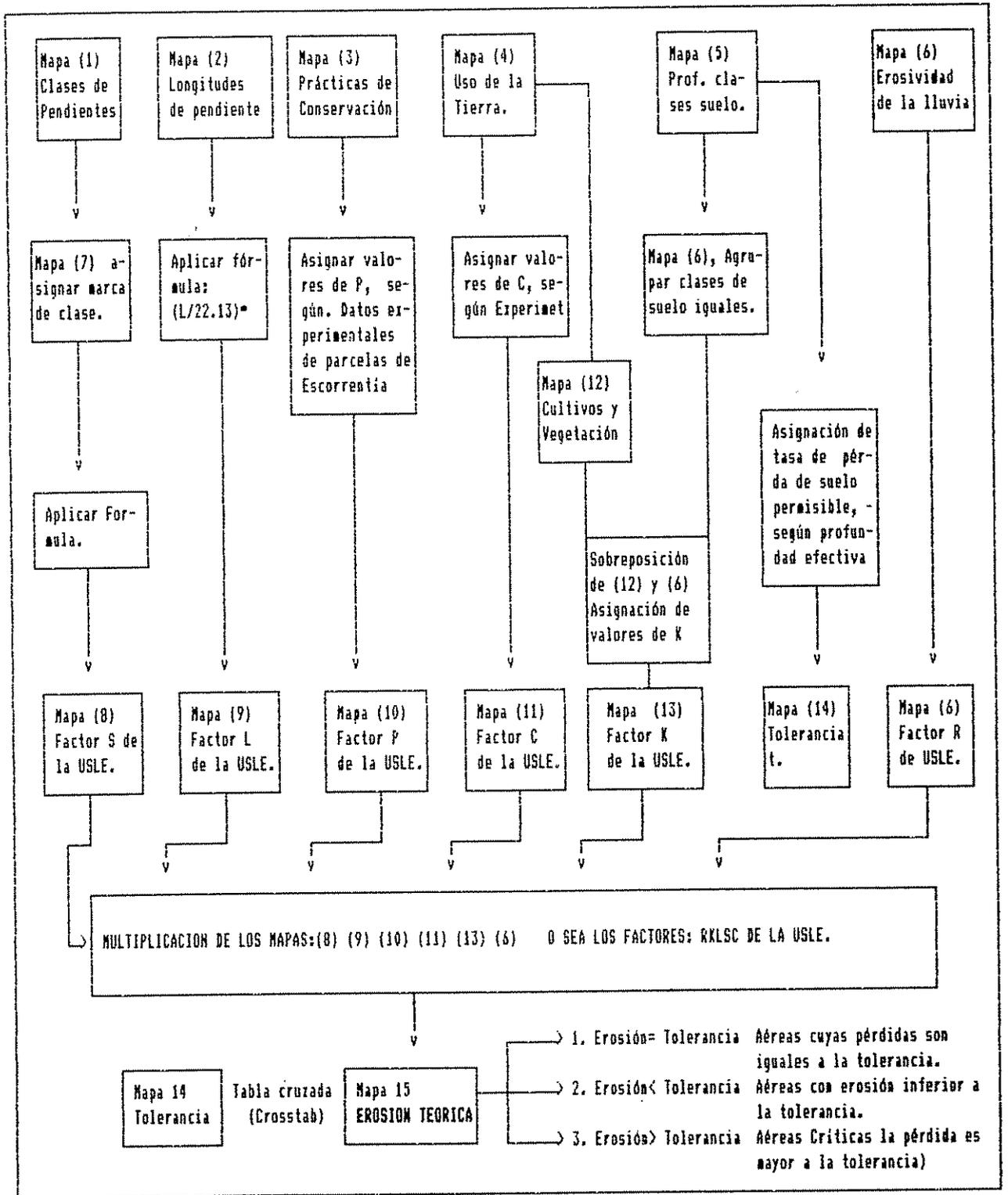
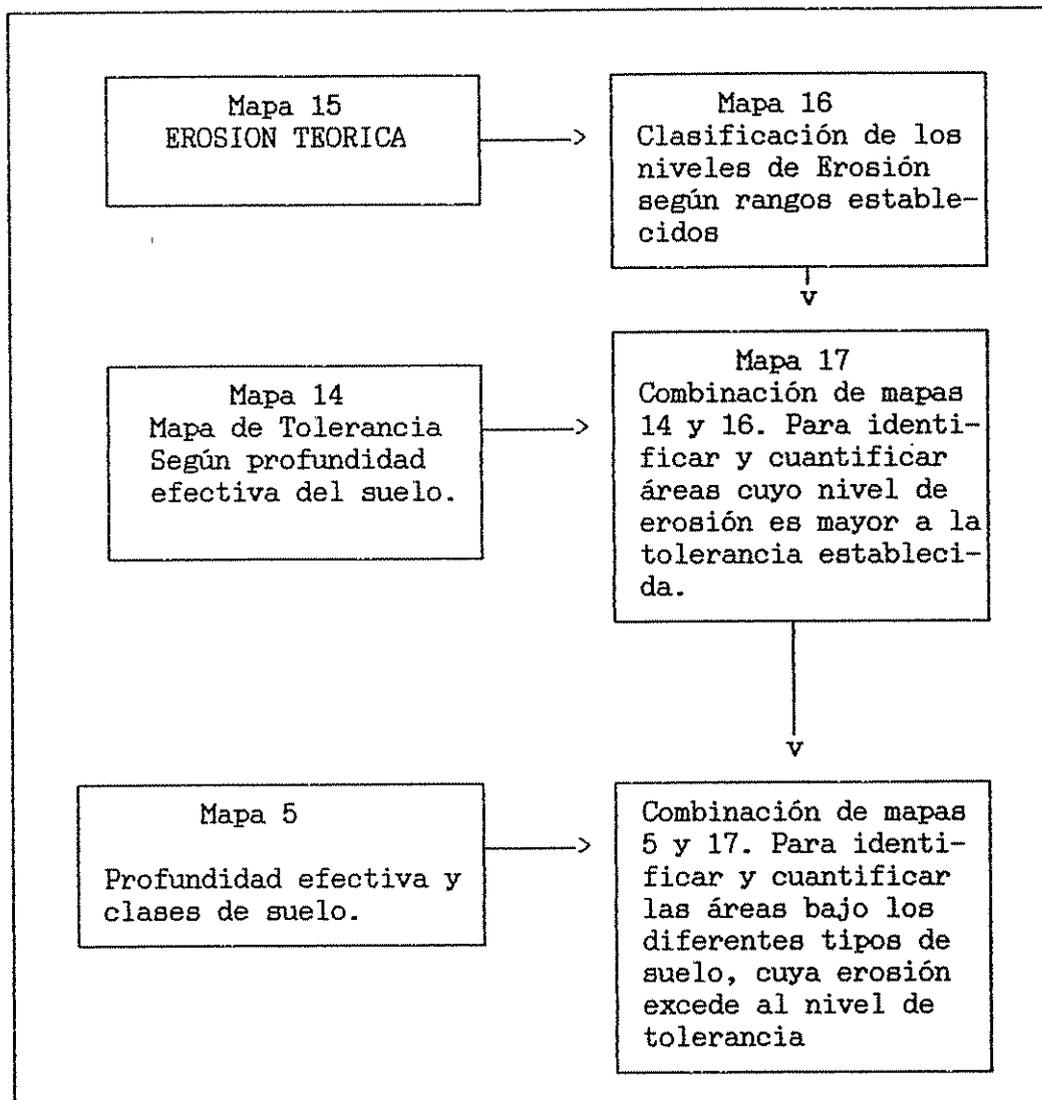


Figura 3. (Continuación) Modelo cartográfico para evaluar el proceso de erosión hídrica utilizando la USLE y un sistema de información geográfico, en la subcuenca del río Pensativo.



3.12. Diseño experimental y tratamientos

Los datos analizados provienen de cuatro evaluaciones hechas en los años 1989, 1990, 1991 y 1992, del ensayo, establecido en 1987; bajo el diseño experimental de bloques al azar con cinco repeticiones y cuatro tratamientos (prácticas de conservación de suelo). La unidad experimental utilizada fue la parcela de escorrentía de 7 x 7 m y pendiente promedio de 32%. En las Figuras 4 y 5 se muestra un esquema de las prácticas evaluadas.

Los datos registrados durante los cuatro años sirvieron de base para realizar el análisis estadístico.

3.13. El modelo estadístico utilizado para analizar las variables de respuesta fue

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_i + P_j + C_k + (CP)_{jk} + \epsilon_{ijkm}$$

donde:

Y_{ijk}	=	Variable respuesta
μ	=	Efecto de la media general
β_i	=	Efecto de repetición (i= 1.....5)
P_j	=	Efecto de práctica de conservación (j= 1.....4)
C_k	=	Efecto de cultivo (k= 1.....2)
$(CP)_{jk}$	=	Efecto de Interacción práctica por cultivo
ϵ_{ijkm}	=	Efecto del error experimental

El modelo anterior fue ajustado por la covariable intensidad máxima, para todas las variables (sedimento, escorrentía, rendimiento), excepto para la variable carga sólida específica, en el que el modelo fue ajustado por la covariable precipitación.

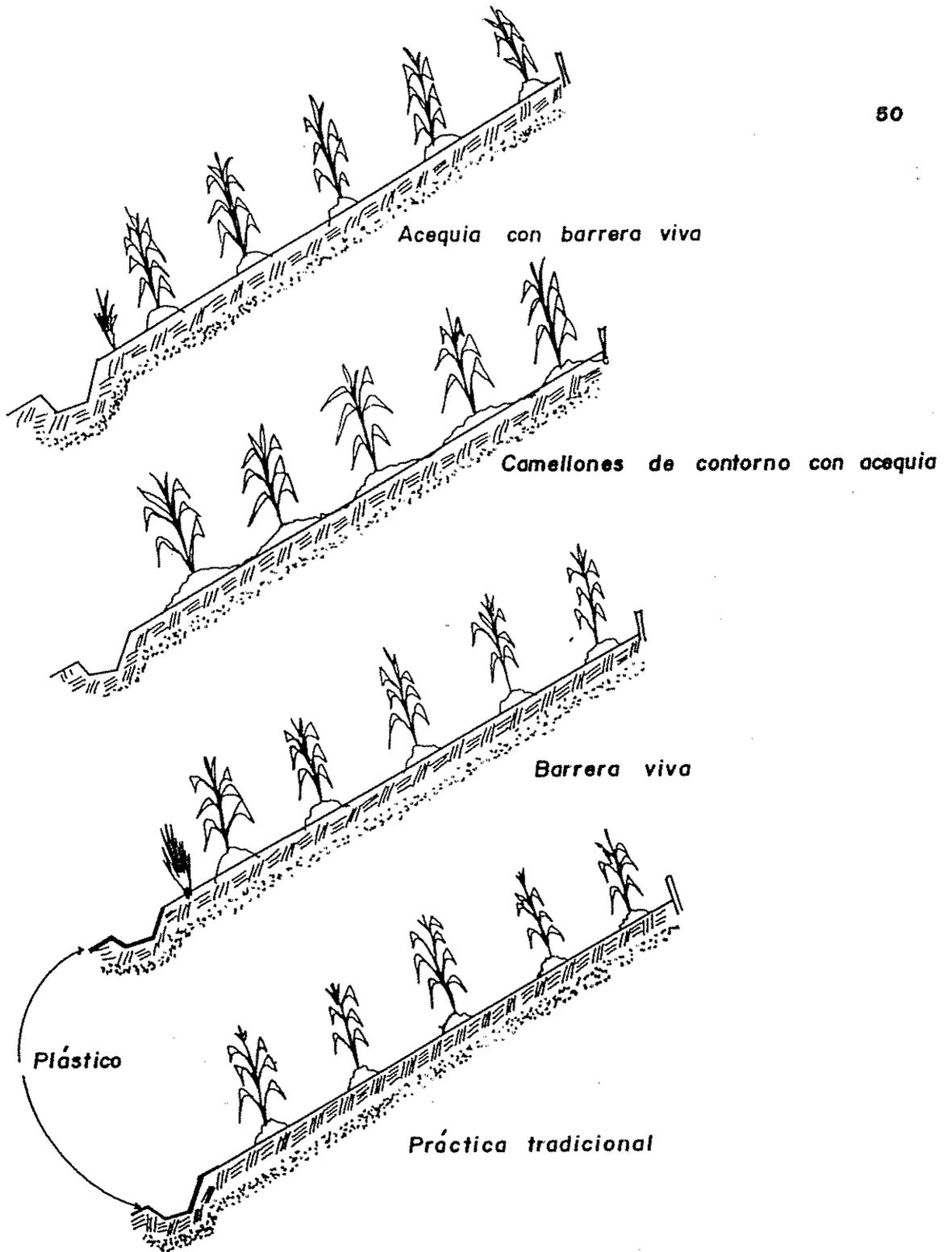
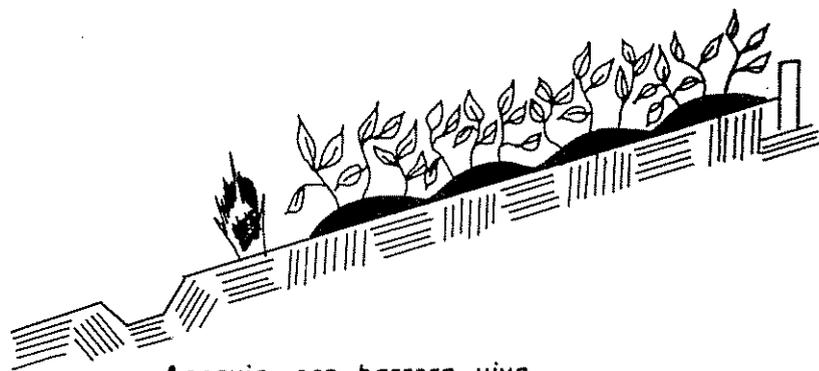


FIGURA 4:

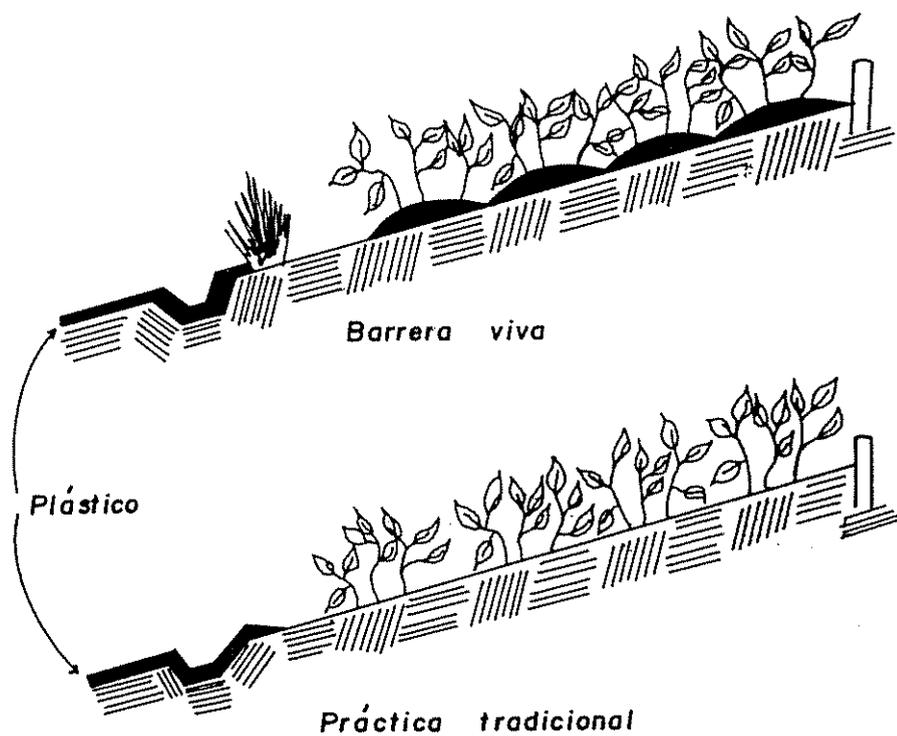
Sección transversal de las prácticas evaluadas en el cultivo de maíz. Tomado de Revolorio Q (1989)



Acequia con barrera viva



Camellón en contorno con acequia



Barrera viva

Plástico

Práctica tradicional

FIGURA 5: Sección transversal de las prácticas evaluadas en el cultivo de frijol. Tomado de López H. (1990).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Factores de la ecuación universal de pérdida de suelo a nivel de subcuenca

4.1.1 Factor de erosividad de las lluvias (R)

El factor R en la subcuenca del río Pensativo varía entre los valores de 4026.52 y 5315.70, con un valor promedio de 4563.55 y desviación estándar de 234.60 en MJ.mm/ha.h.año.

En el Cuadro 7, se presentan los valores de erosividad de la lluvia para las precipitación media y para periodos de retorno de 5 y 10 años.

Cuadro 7. Factor erosividad de las lluvias en MJ.mm/ha.h.año para precipitaciones medias y periodos de retorno de 5 y 10 años.

Factor R	Val. Mínimo	Val. Máx.	Val. Medio	Des. standard
R medio	4126.5212	5315.7041	4563.5517	234.6100
R (t=5 años)	5385.0700	6868.6460	6002.2446	280.8828
R (t=10 años)	6493.3964	8146.4057	7178.0890	317.9431

Es interesante observar la relación directa que existe entre los periodos de retorno y el potencial erosivo de las lluvias. Esto es de gran importancia en el diseño de prácticas mecánicas de conservación de suelo. Así por ejemplo, si consideramos la erosividad de las lluvias con un periodo de retorno de 10 años, que para la subcuenca del río Pensativo es de 7178.0890 MJ.mm/ha.h.año.; la probabilidad que éste fenómeno ocurra en un año es $P(F)=0.10$; en cinco, $P(F)=0.50$ y en diez es $P(F)=1$. La probabilidad de Riesgo $P(R)$ que éste fenómeno se presente en los próximos cinco años es de $P(R)=0.40951$; en diez años es de $P(R)=0.6513$.

En los Cuadros 8 y 9 se observan algunos valores de probabilidad y riesgos para el factor R.

Cuadro 8. Probabilidad de ocurrencia y no ocurrencia que una lluvia con potencial erosivo de 7178.089 MJ.mm./ha.h.año se presente en los próximos años.

AÑO	Probabilidad de Ocurrencia	Probabilidad de No Ocurrencia
1.00	0.10	0.90
2.00	0.20	0.80
3.00	0.30	0.70
4.00	0.40	0.60
5.00	0.50	0.50
6.00	0.60	0.40
7.00	0.70	0.30
8.00	0.80	0.20
9.00	0.90	0.10
10.00	1.00	0.00

Fuente: Ecuaciones de Viessman (1989).

Cuadro 9. Probabilidad que el fenómeno no ocurra en años sucesivos y probabilidad de riesgo que el fenómeno ocurra en por lo menos una vez en n años sucesivos.

AÑO	Probabilidad de no ocurrencia	Probabilidad de Riesgo
1.00	0.90	0.10
2.00	0.81	0.19
3.00	0.73	0.27
4.00	0.66	0.34
5.00	0.59	0.41
6.00	0.53	0.47
7.00	0.48	0.52
8.00	0.43	0.57
9.00	0.39	0.61
10.00	0.35	0.65
11.00	0.31	0.69
12.00	0.28	0.72

Fuente: Ecuaciones de Viessman (1989).

Continuación Cuadro 9.

ANO	Probabilidad de no ocurrencia	Probabilidad de Riesgo
13.00	0.25	0.75
14.00	0.23	0.77
15.00	0.21	0.79
16.00	0.19	0.81
17.00	0.17	0.83
18.00	0.15	0.85
19.00	0.14	0.86
20.00	0.12	0.88
21.00	0.11	0.89
22.00	0.10	0.90
23.00	0.09	0.91
24.00	0.08	0.92
25.00	0.07	0.93
26.00	0.06	0.94
27.00	0.06	0.94
28.00	0.05	0.95
29.00	0.05	0.95
30.00	0.04	0.96
31.00	0.04	0.96
32.00	0.03	0.97
33.00	0.03	0.97
34.00	0.03	0.97
35.00	0.03	0.97
36.00	0.02	0.98
37.00	0.02	0.98
38.00	0.02	0.98
39.00	0.02	0.98
40.00	0.01	0.99

Fuente: Ecuaciones de Viessman (1989).

Si el riesgo de una lluvia erosiva es alta, entonces las dimensiones de las prácticas mecánicas tendrán que ser relativamente grandes, lo que significa un incremento en los costos de construcción; ya que de lo contrario, puede ocurrir mayor erosión que la que ocurriría en áreas sin prácticas de conservación. Por lo tanto, la elección de la(s) práctica(s) y los aspectos socioeconómicos son de suma importancia, a considerar en la rehabilitación de la subcuenca del Río Pensativo.

Bajo las condiciones de Turrialba, Costa Rica, en el sitio denominado San Lucas del CATIE, Rocha (1977) encontró un valor de R de 4362.57 MJ.mm/ha.h.año, valor muy parecido al promedio obtenido para la subcuenca del río Pensativo.

Para las mismas condiciones de Turrialba, Costa Rica, Amezquita y Forsythe (1975) dan valores de R de 3524 MJ.mm/ha.h.año.

Garzón (1991), para las condiciones de San Juan sur de Turrialba, Costa Rica, encontró valores de R con alta variación, y con un promedio expresado en sistema internacional de 3524 MJ.mm/ha.h.año.

Un valor R de 255 que en sistema internacional es 4340.10 MJ.mm/ha.hora.año, reporta Varson y Cervantes (1991), para Puriscal, Costa Rica

En el Cuadro 4A y 5A, se muestran los valores de la precipitación y erosividad de la lluvia, para periodos de retorno de cinco y diez años, de las estaciones pluviométricas utilizadas. Puede observarse que la mayoría de estaciones se encuentra en al oeste de la subcuenca, mientras que al norte no se encuentran estaciones pluviométricas.

4.1.2 Factor de erodabilidad de suelo (K)

El factor K obtenido en la subcuenca, tiene una distribución homogénea, ya que los valores medios son de 0.024779, 0.024923. y 0.024655, con desviación estándar de 0.003739, 0.003925, y 0.003792 t.ha.h/ha.MJ.mm. para los años 1973, 1980 y 1992, respectivamente.

En general éste factor muestra valores relativamente bajos, dando al suelo una propiedad de erodabilidad moderada; lo cual confirma lo expuesto por OEA (1972), quien atribuye al factor de erodabilidad del suelo de algunas regiones de Guatemala, el que los materiales del suelo permanezcan todavía después de cientos de años de cultivo intenso, en declives precipitosos con poco o ningún tratamiento de manejo o conservación aplicado.

Valores de K de 0.15 y 0.103 que en unidades internacionales es 0.002 y 0.014 t.ha.h/ha.MJ.mm. encontró Amézquita y Forsythe (1975), en Turrialba, en suelo de las series Instituto y Colorado.

En Guatemala, en la altiplanicie central, y para la región de Alotenango, OEA (1972), reporta valores de K de 0.11 a 0.25 y 0.09 que en sistema internacional equivalen a 0.014 a 0.03 y 0.012, respectivamente, valores similares a los encontrados en la subcuenca del río Pensativo.

El Cuadro 10, muestra los valores del factor K en la subcuenca del río Pensativo.

4.1.3. Factor longitud de pendiente (L)

Este factor es bastante similar en los diferentes años, existiendo poca variación entre los diferentes años, ya que dicho factor es función del tamaño de parcela, el distanciamiento promedio entre las prácticas de conservación de suelo presentes en la subcuenca y la distancia entre las partes altas y un cauce natural del agua, cuando el uso de la tierra es vegetación.

Cuadro 10. Valores de K según suelo y uso de la tierra.

Tipo de suelo.	Uso de la tierra.	Valor para el factor K en $\frac{t.ha.h}{ha.MJ.mm.}$
1. Typic Eutrandepts	cultivo	0.0282
1. Typic Eutrandepts	bosque	0.0213
2. Typic Ustropepts	cultivo	0.0244
2. Typic Ustropepts	bosque	0.0195
3. Typic Vitrandepts	cultivo	0.0302
3. Typic Vitrandepts	bosque	0.0229
4. Mollic Vitrandepts	cultivo	0.0322
4. Mollic Vitrandepts	bosque	0.0237
5. Fluventic Ustipsamments	cultivo	0.0257
5. Fluventic Ustipsamments	bosque	0.0186
6. *Asociación	cultivo	0.0329
6. *Asociación	bosque	0.0228

*Asociación: suelos: Entic Eutrandepts con Lithic Ustorhents

El valor promedio para este factor es de 4.385654, 4.385654, 4.518412 y 4.336615. El valor máximo es de 9.744366, 9.744366 y 10.296221, 10.296221 con desviación estándar de 2.717370, 2.696232, 2.717411, 2.813245, valores correspondientes a los años 1973, 1980, 1992 y haciendo la modelación.

4.1.4 Factor pendiente (S)

En la subcuenca se encuentran una variación grande en lo que a pendientes se refiere. Ya que existen pendientes que van desde 0 a 8%, hasta áreas que poseen más de 60%.

El valor medio del factor S es de 4.705971, con desviación estándar de 2.879013, un valor mínimo de 0.4617 y un valor máximo de 8.6558, lo que pone de manifiesto la gran variabilidad espacial de las pendientes.

Puede observarse en el Cuadro 6A, el peso asignado utilizando la ecuación de McCool *et al* (1989) que considera la influencia de las variables longitud y pendiente, pero en diferente proporción a las propuestas por Wishmeier y Smith (1978).

A continuación se presenta el Cuadro 11 con los valores correspondientes al factor S de la USLE, de acuerdo con el porcentaje de pendiente.

Cuadro 11. Valores del factor S asignado a cada rango de pendiente

Rango de Pendiente en %	Marca de Clase en %	Valor del factor S de la USLE.
0 - 8	4	0.4647
8 - 16	12	1.5016
16 - 20	18	2.4762
20 - 30	25	3.5746
30 - 40	35	5.0499
40 - 50	45	6.3941
50 - 60	55	7.5962
> 60	65	8.6558

En la Figura 6. se muestra el mapa de pendientes en porcentaje, al cual se asignaron los valores que se muestran en el Cuadro 11. Para una georeferenciación aproximada de los mapas presentados en el documento utilizar la Figura 1A contenido en el sobre de la contraportada.

4.1.5 Factor Cobertura-Prácticas de conservación (CP)

Este factor se obtuvo del producto de los valores a) sedimento observado en parcelas de escorrentía, b) factor R, c) factor K, d) factor L y S, éstos últimos calculados para las condiciones del experimento utilizando la metodología indicada anteriormente.

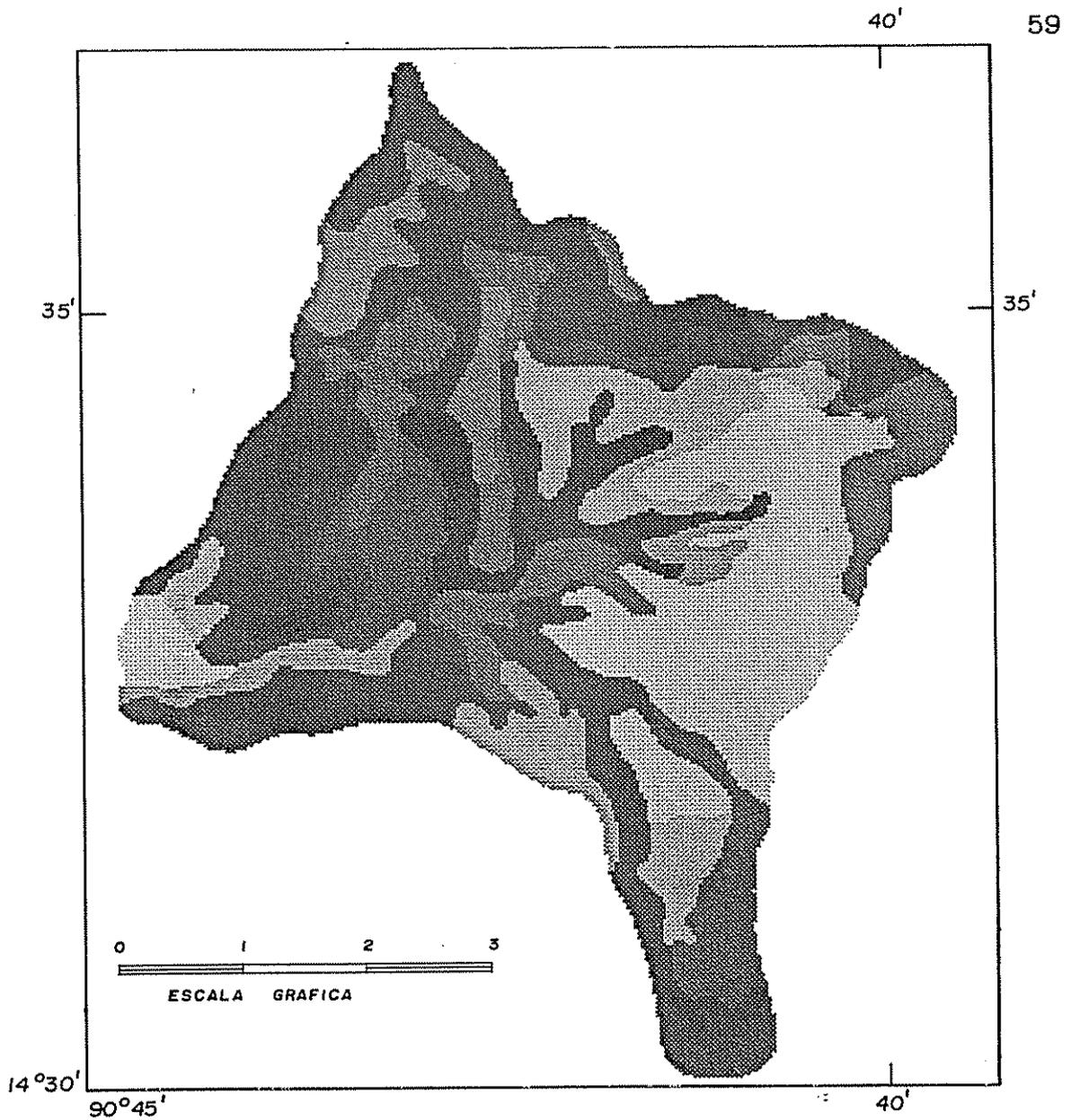


FIGURA 6 : Mapa de pendientes de la subcuenca del río Pensativo.

Rango de pendiente en%

Referencia

1. 0-8%



2. 8-16%



3. 16-20%



4. 20-30%



5. 30-40%



6. 40-50%



7. 50-60%



8. >60%



FUENTE: Rosal 1988

El Cuadro 12, muestra que la interacción de práctica por cultivo es altamente significativa, lo cual quiere decir que el efecto de una misma práctica para los cultivos de maíz y frijol es diferente.

Esto confirma lo expuesto por Mitchell y Bubenzer (1980), quienes indican que el factor C de la USLE incluye los efectos interrelacionados de la cubierta, la secuencia de cultivos, el nivel de productividad, duración de la estación de crecimiento, prácticas de cultivo, manejo de residuos y distribución de la precipitación.

Las prácticas más efectivas para el control de la erosión (menor valor del factor CP) son acequias con barreras viva, barrera viva y acequia con camellones en contorno cuando se encuentran asociadas al cultivo de frijol. Un comportamiento similar se mostró en la práctica acequia de ladera con camellones en contorno en el cultivo de maíz, siendo éstas las combinaciones que ofrecen una mejor protección al suelo contra el proceso de la erosión hídrica.

La práctica de acequia con camellones en contorno es mejor que la práctica de barrera viva cuando ambas están bajo el cultivo de maíz en cuanto a efectividad de control de la erosión hídrica. La práctica más erosiva es la tradicional bajo el cultivo de maíz.

En general, la asociación de cualquier práctica es mejor bajo cultivo de frijol que cuando la práctica se combina con el cultivo de maíz.

Cuadro 12. Análisis de varianza para los factores CP en los cultivos de maíz y frijol bajo cuatro prácticas de conservación de suelo, ajustado por la Intensidad máxima.

Fuente de variación	GL	SC	CM	F	Pr > F
Repetición	4	0.00003967	0.00000992	0.61	0.6546
Práctica de conservación	3	0.00237389	0.00079130	48.92	0.0001**
Cultivo	1	0.00041782	0.00041782	25.83	0.0001**
Práctica*cultivo	3	0.00089457	0.00029819	18.43	0.0001**
Intensidad máxima.	1	0.00068943	0.00068943	42.62	0.0001**
Error	67	0.00108380	0.00001618		
Total	79	0.00549917	CV: 63.53%	$r^2=0.80$	

En el Cuadro 13, se observa que el cultivo de frijol es el que brinda la mayor protección al suelo.

4.1.6 Factor cobertura (C)

A los usos de la tierra existentes en la subcuenca, se les asignó los valores que aparecen el Cuadro 14.

Los valores del factor C para los cultivos de hortalizas, cultivos anuales y maíz con hortalizas, son relativamente bajas si se les compara con los reportados en la literatura. Dichos valores obedecen fundamentalmente a que los valores de pérdidas de suelo observados en las parcelas de escorrentía son relativamente bajos.

El valor del factor C asignado a los cultivos anuales coincide con el que utilizaron Vahrson y Cervantes (1991).

4.1.7. Factor de Prácticas de conservación (P)

Los valores del factor P utilizados para la aplicación de la USLE fueron derivados del factor CP obtenido de parcelas de escorrentía. El procedimiento consistió en

Cuadro 13. Comparación de medias para los factores CP según prueba t.

Prácticas de conservación	Cultivo	Valores de los Factores CP	
Acequia con barrera viva	Frijol	0.00151100	A
Barrera viva	Frijol	0.00165269	A
Acequia con camellones en contor.	Frijol	0.00203727	A
Acequia con barrera viva	Maíz	0.00241522	A
Acequia con camellones en contor.	MAÍZ	0.00275608	B
Práctica tradicional	Frijol	0.00690519	C
Barrera viva	Maíz	0.00934397	D
Practica Tradicional	Maíz	0.02402629	E

Prácticas de conservación con igual letra indican que no hay diferencias significativas al 1% de acuerdo con una prueba t.

Cuadro 14. Valores del factor C utilizados en la USLE para la evaluación de la erosión hídrica.

Tipo de Cobertura	Factor C	Fuente
Poblado rural.....	0.3000	Esp. en suelos
Industrias.....	0.3000	Esp. en suelos
Hortalizas.....	0.1500	Esp. en suelos
Cultivos anuales (maíz-frijol)....	0.2500	Esp. en suelos
Maíz-hortalizas.....	0.2000	Esp. en suelos
Pastos naturales.....	0.0020	Wishmeier y Smith (1978)
* Uso forestal.....	0.0001	Wishmeier y Smith (1978)
Café con sombra.....	0.0700	Vahrson y Cervantes (1991)
Café sin sombra.....	0.0700	Vahrson y Cervantes (1991)

*Incluye: matorrales, bosque natural mixto, bosque natural deciduo, bosque de coníferas.

dividir el factor CP entre el factor C reportado en la literatura y por especialistas en suelos.

El resultado obtenido fue aproximado, para obtener los valores que se presentan en el Cuadro 15.

Cuadro 15. Factor de prácticas según cultivos.

Prácticas	Hortalizas	Maíz-frijol	Maíz-hortalizas
1. Ac-Bv	0.015	0.015	0.015
2. Ac-Sc	0.020	0.020	0.020
3. Bv	0.015	0.050	0.035
4. P. Tradicional	0.060	0.120	0.100
5. Terrazas	0.001	0.001	0.001

Fuente: Análisis de registros de cinco años, de parcelas de escorrentía instaladas por el Instituto de Investigaciones Agronómicas de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en la subcuenca del río Pensativo.

4.2. Valores de tolerancia según tipo de suelo

En la Figura 7. se puede apreciar el mapa de suelos y profundidad efectiva, al cual fueron asignados valores de cuatro categorías que se indican en el Cuadro 3.

Lo que el modelo hace para estimar la tolerancia, es asignar la tasa máxima permisible de pérdida de suelo, al suelo cuya profundidad es mayor y para los suelos con menores profundidades, asigna una tasa menor que es directamente proporcional a la profundidad efectiva ajustándolo por la función sinusoidal.

4.3. Valores de pérdida de suelo en los años 1973, 1980 y 1992 y haciendo modelación para el año 1992

En el Cuadro 16 se pueden apreciar los valores promedio y total de sedimento aportado, obtenidos al aplicar la USLE en la subcuenca del río Pensativo, durante los años 1973, 1980, 1992 y al modelar la práctica barrera viva, asumiendo una distancia entre barreras de 30 metros.

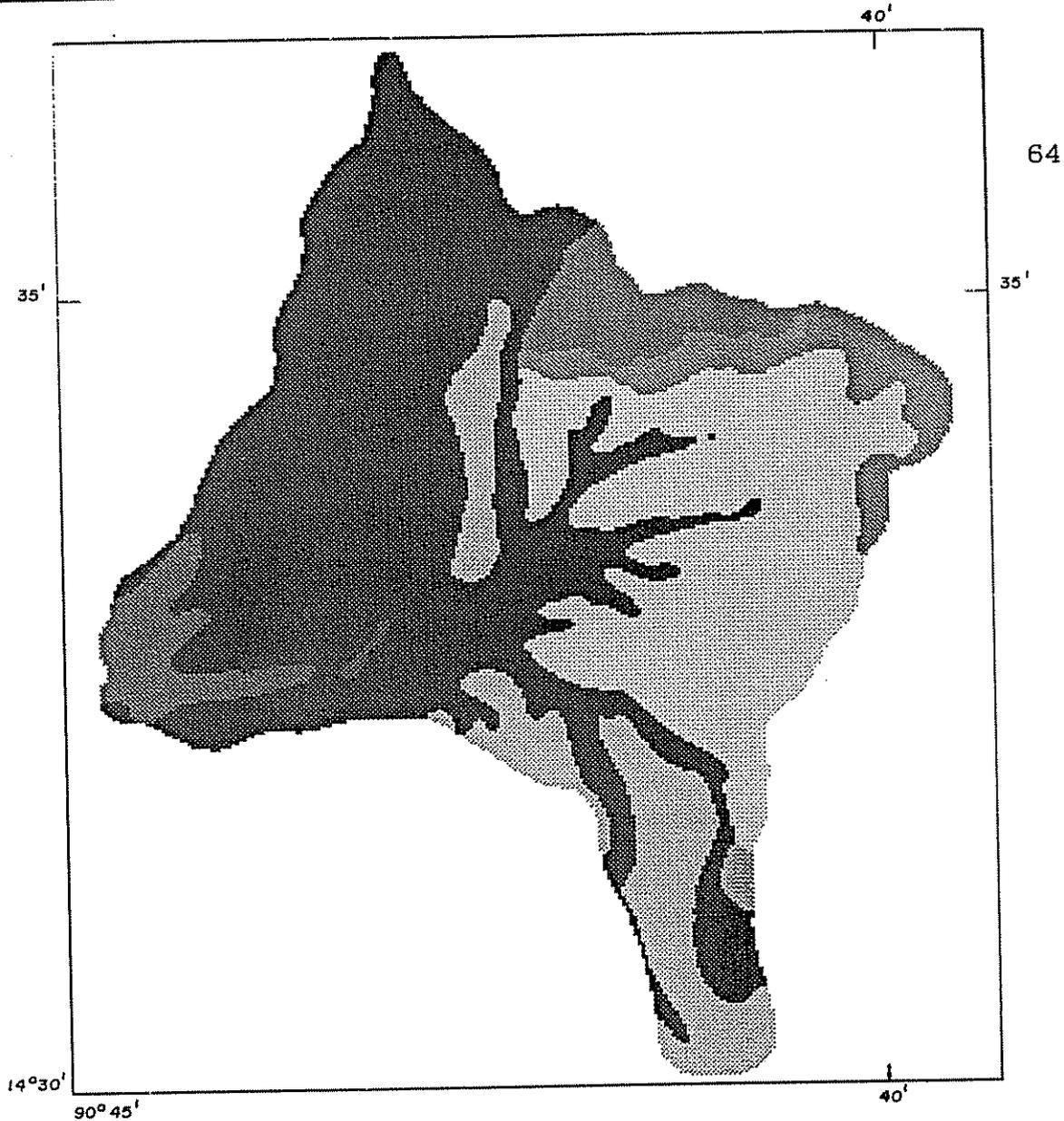


FIGURA 7: Mapa de clases de suelo y profundidad efectiva, en la subcuenca del río Pensativo.

FUENTE: Sobreposición de los mapas de suelo y unidades de tierra de Rosal (1988).

SUELO	PROFUNDIDAD EFECTIVA cm	REFERENCIA
1. Typic eutrandepts	T. EU-90	
2. Typic eutrandepts	T. UT-52	
3. Typic ustropepts	T. US-90	
4. Typic ustropepts	T. US-51	
5. Typic vitrandepts	T. VI-51	
6. Mollic vitrandepts	M. VI-90	
7. Mollic vitrandepts	M. UI<44	
8. Fluventic ustipsamments	F. US-90	
9. Fluventic ustipsamments	F. US-75	
10. Asociación	ASOC<44	

Cuadro 16. Cuantificación las pérdidas de suelo a nivel de subcuenca

AÑO	VALOR MEDIO Ton/ha	SUMA TOTAL Toneladas
1973	61.24	180451.507
1980	67.39	198568.935
1992	43.72	128823.064
1992-M*	39.87	117491.434

* Haciendo modelación en 1992.

Un dato interesante es la suma total de sedimento en los diferentes años. Al realizar una modelación puede observarse que en los años 1973 y 1980, la cantidad de sedimento estimada fue relativamente alta y similar para ambos años, y que disminuyó en el año 1992 y más cuando se modificaron los valores de los factores L y P en las áreas que actualmente se encuentran bajo práctica tradicional.

La diferencia entre las dos décadas del 73 al 80 y la del 92, obedecen a que en el transcurso de 1980 a 1992 se incrementó el área bajo prácticas de conservación de suelo y a cambios en el uso de la tierra.

Si a partir del año 1992 se establecieran programas de conservación de suelo, teóricamente la cantidad de sedimento se reduciría aproximadamente en un 9% o sea en 11331.37 toneladas/ha/año, si la práctica a implantar fuera barrera viva. Desde luego de esta cantidad total mucha es depositada en otros sitios antes de llegar a los cauces naturales que lleva el sedimento a la parte baja de la subcuenca.

En el cuadro anterior no se incluyeron los valores máximos ya que tienen poca frecuencia, y obedecen a errores de desplazamiento en la digitalización de dos o más mapas.

Los valores obtenidos con la ecuación universal de pérdida de suelo parecen sobre estimar los cálculos hechos por Cabrera (1982), quien utilizando el índice de Fourniner estima 64000.00 toneladas/año, (21,00 t/ha); sin embargo, la gran ventaja de estimar la erosión mediante la ecuación universal de pérdida de suelo haciendo un análisis espacial es identificar las áreas que más aportan sedimento.

4.4. Rangos de erosión, durante los años 1973, 1980, 1992 y modelando para las áreas bajo la práctica tradicional

El comportamiento de los diferentes años es parecido y muestran en general la misma tendencia. Las áreas con rango de erosión entre 2.00-4.50, y entre 4.5 a 9.5 ton/ha/año son las que aportan la menor cantidad de sedimento. Condiciones más o menos similares presentan los rangos de 0-2.00 y 9.5-11 ton/ha, al aportar una cantidad moderada.

Las áreas que se encuentran bajo el rango de mayor a 11 ton/ha, son las más importantes en la producción de sedimento, y el porcentaje de dichas áreas varía entre el 14% y el 24%. Esto significa que un porcentaje de área relativamente pequeña esta aportando la mayor cantidad de sedimento. Estos aportes tan grandes son sobre estimados en cierta medida, si consideramos los errores de desplazamiento al momento de hacer las superposiciones de dos o más mapas.

En las Los Cuadros 17, 18 y las Figuras 8, 9, 10 y 11, se puede apreciar espacialmente los grados de erosión en los años 1973 a 1992 y al realizar la modelación con una práctica de conservación. También se observa una relación inversa entre el porcentaje de área que ocupa cada rango y la cantidad de sedimento que aporta el mismo

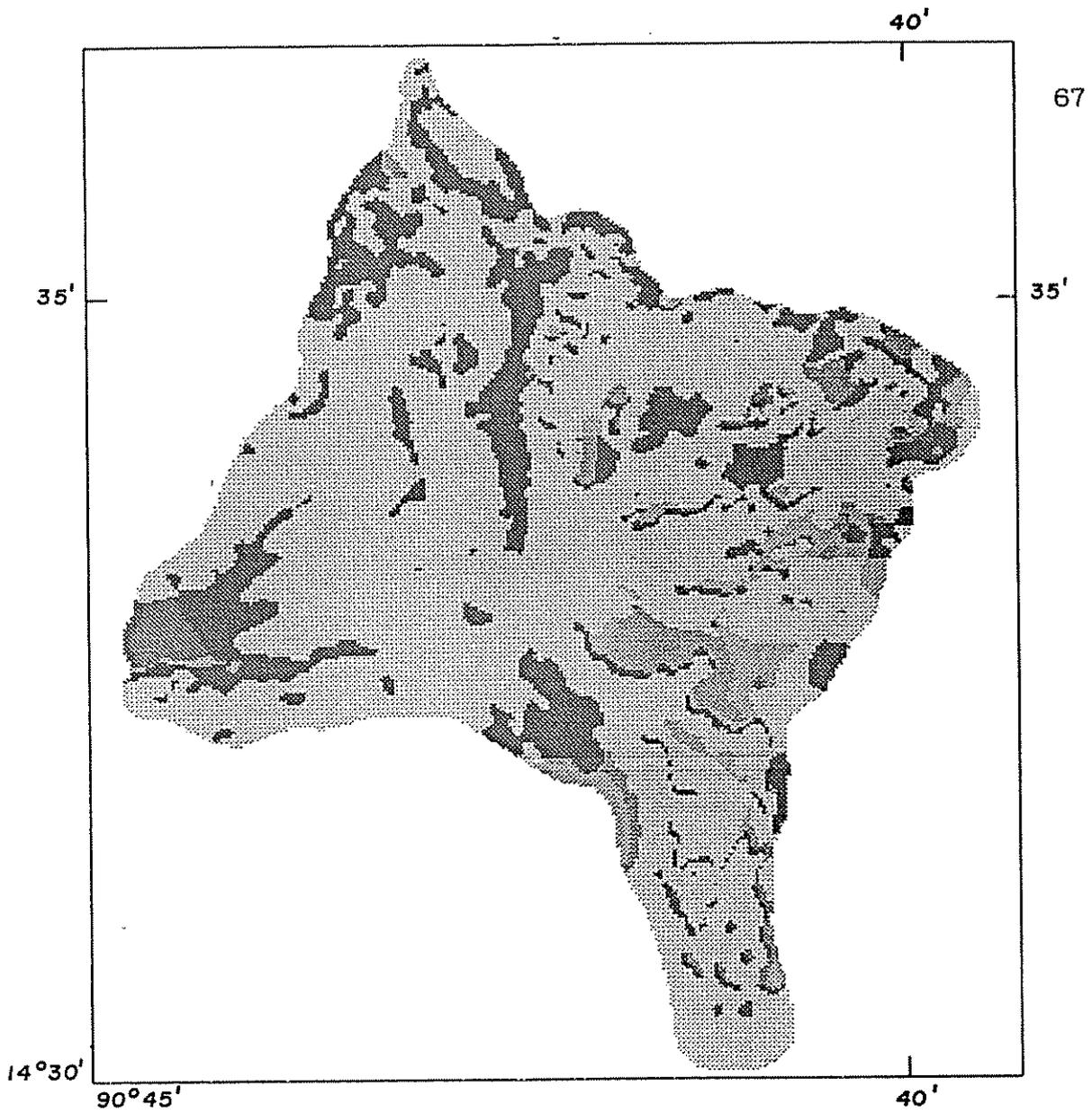


FIGURA 8 : Mapa de rangos de erosión en to/ha de la subcuenca del río Pensativo en 1973.

FUENTE: Análisis espacial aplicando un sistema de información geográfico.

RANGOS DE EROSION EN to/ha

REFERENCIA

1. 0.00 - 2.00

2. 2.00 - 4.50

3. 4.50 - 9.50

4. 9.50 - 11.0

5. > 11



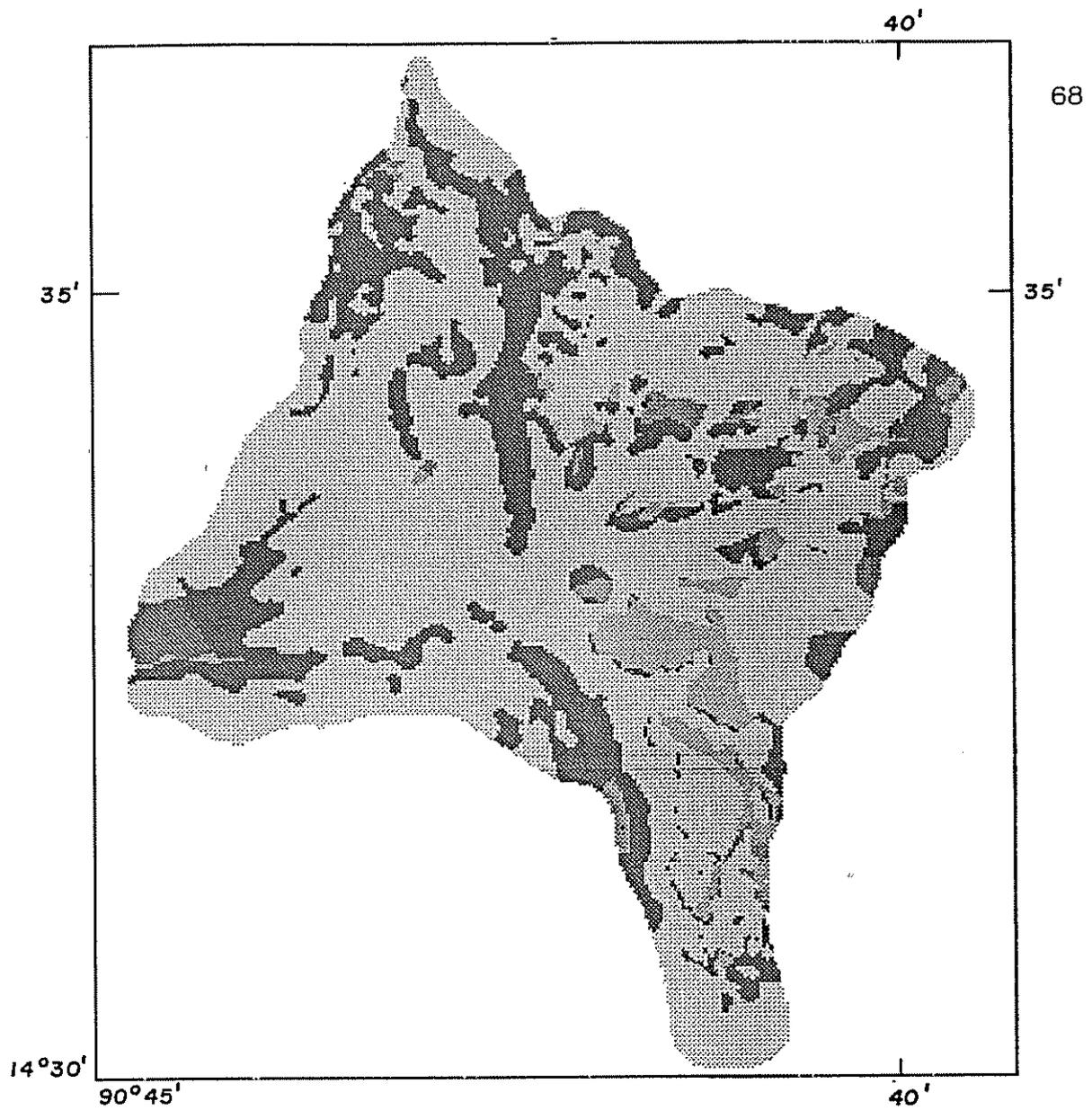


FIGURA 9: Mapa de rangos de erosión en to/ha de la subcuenca del río Pensativo en 1980.

FUENTE: Análisis espacial aplicando un sistema de información geográfico.

RANGOS DE EROSION EN to/ha

1. 0.00 - 2.00

2. 2.00 - 4.50

3. 4.50 - 9.50

4. 9.50 - 11.0

5. > 11

REFERENCIA



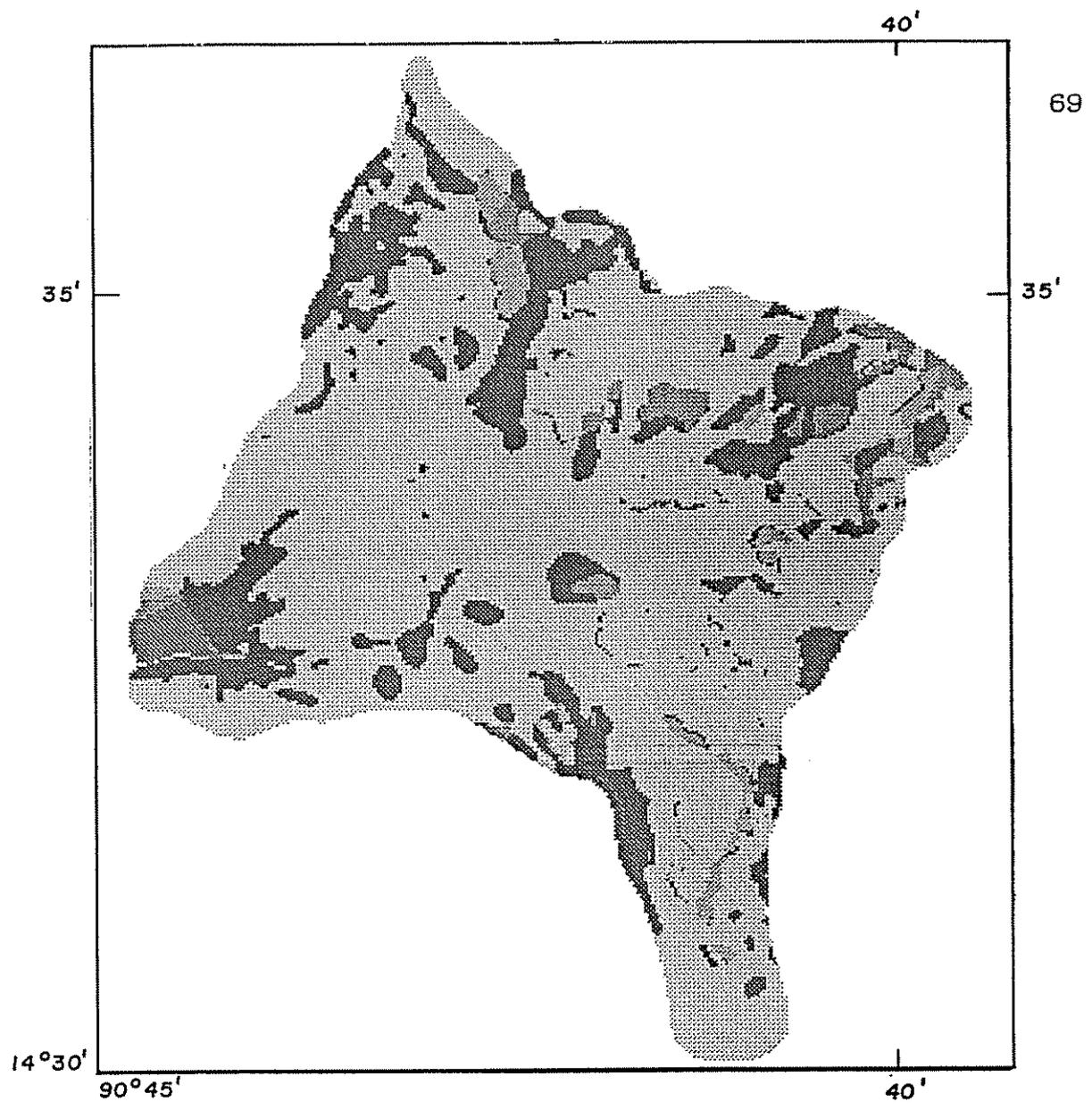


FIGURA 10: Mapa de rangos de erosión en to/ha de la subcuenca del río Pensativo en 1992.

FUENTE: Análisis espacial aplicando un sistema de información geográfico.

RANGOS DE EROSION EN to/ha

REFERENCIA

1. 0.00 - 2.00



2. 2.00 - 4.50



3. 4.50 - 9.50



4. 9.50 - 11.0



5. > 11



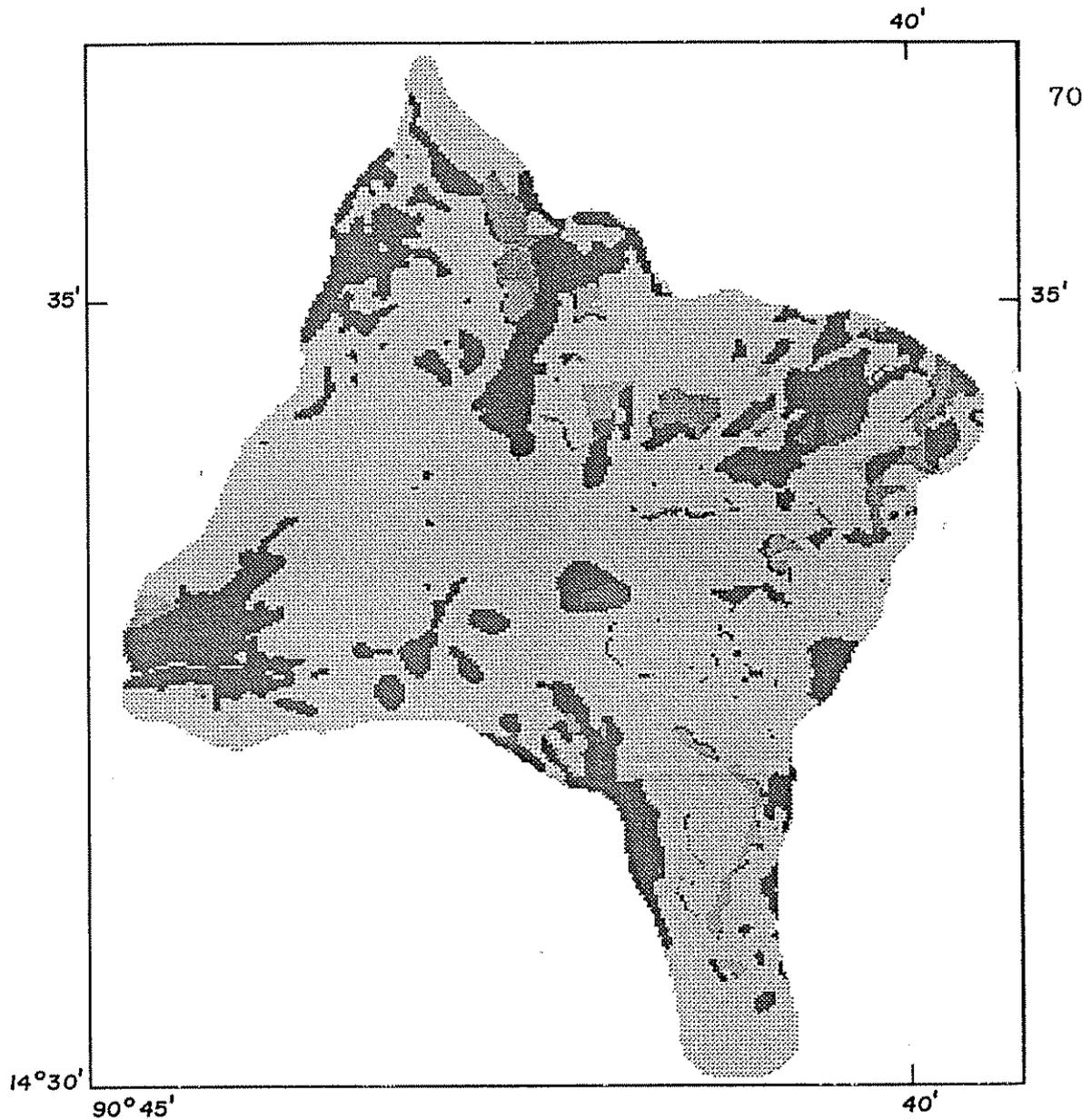


FIGURA II: Mapa de rangos de erosión en to/ha de la subcuenca del río Pensativo suponiendo la sustitución de la práctica tradicional por la práctica de conservación de barréas vivas en 1992.

FUENTE: Análisis espacial aplicando un sistema de información geográfico.

RANGOS DE EROSION to/ha

1. 0-2
2. 2-4.5
3. 4.5-9.5
4. 9.5-11
5. >11

REFERENCIA



Cuadro 17. Cuantificación de las pérdidas de suelo, en toneladas para cada rango establecido.

AÑO	RANGO DE EROSIÓN EN TONELADAS/HA				
	0-2.00	2.00-4.5	4.5-9.5	9.5-11	> 11
1973	830.26	312.36	628.52	381.09	178303.6
1980	785.78	464.84	428.61	441.50	196456.9
1992	792.58	246.81	556.28	447.64	126782.0
1992-M	810.52	294.93	1324.79	783.12	114262.0

Cuadro 18. Porcentaje de área que ocupa cada rango de erosión.

año	RANGOS DE EROSION EN TON/HA				
	0.00-2.00	2.00-4.50	4.50-9.50	9.50-11.000	>11.00
1973	71.00	4.10	3.67	1.28	19.95
1980	67.38	5.18	1.89	1.48	24.08
1992	73.15	2.51	2.78	1.49	20.09
1992-M *	74.22	3.07	6.17	2.62	13.94

* Haciendo modelación en 1992

4.5. Clasificación de la erosión según tolerancia durante los años 1973, 1980, 1992 y modelando en áreas bajo la práctica tradicional

Quando se combinó, (Cuadro 3 y Cuadro 17) el mapa de tolerancia y el mapa de clasificación de la erosión, se discriminaron áreas que presentan igual, menor y mayor nivel de erosión que el nivel de tolerancia permisible.

Los resultados se muestran en los Cuadros 19, 20 y las Figuras 12, 13, 14 y 15.

Puede observarse que la tendencia para las áreas con erosión igual a tolerancia se mantiene; en cambio si hay diferencias del año 1980 a 1992 en forma descendente en

áreas cuya erosión es inferior al nivel de tolerancia permisible.

Aparentemente la producción de sedimento de las áreas con niveles de erosión mayor al nivel de tolerancia disminuyó del año 1973 al año 1992, y se reduciría aún más si se implantarían prácticas de conservación de suelo como la barrera viva y otras prácticas agroforestales.

Cuadro 19. Cuantificación de las pérdidas de suelo en áreas con erosión igual, menor y mayor que el nivel de tolerancia permisible.

ANO	E = T	E < T	E > T *
1973	883.95	932.86	178638.80
1980	874.42	932.50	196770.51
1992	841.80	653.89	127329.55
1992-M **	867.61	720.46	115905.06

* E: Erosión, T= Tolerancia

** Haciendo modelación en 1992

Cuadro 20. Cuantificación de áreas con erosión igual, menor y mayor que el nivel de tolerancia permisible.

ANO	E = T	E < T	E > T *
1973	40.77	37.35	21.91
1980	37.27	36.96	25.80
1992	39.04	37.82	23.17
1992-M **	39.44	38.87	21.73

* E: Erosión, T: Tolerancia.

** Haciendo modelación en 1992.

4.6. Cuantificación del sedimento en suelos que sobrepasan el límite de tolerancia permisible

El mapa que contiene áreas con erosión igual, menor y mayor al nivel de tolerancia, fue agrupado en dos categorías, así se unieron en una sola categoría aquellas áreas con igual y menor erosión que el nivel de tolerancia y

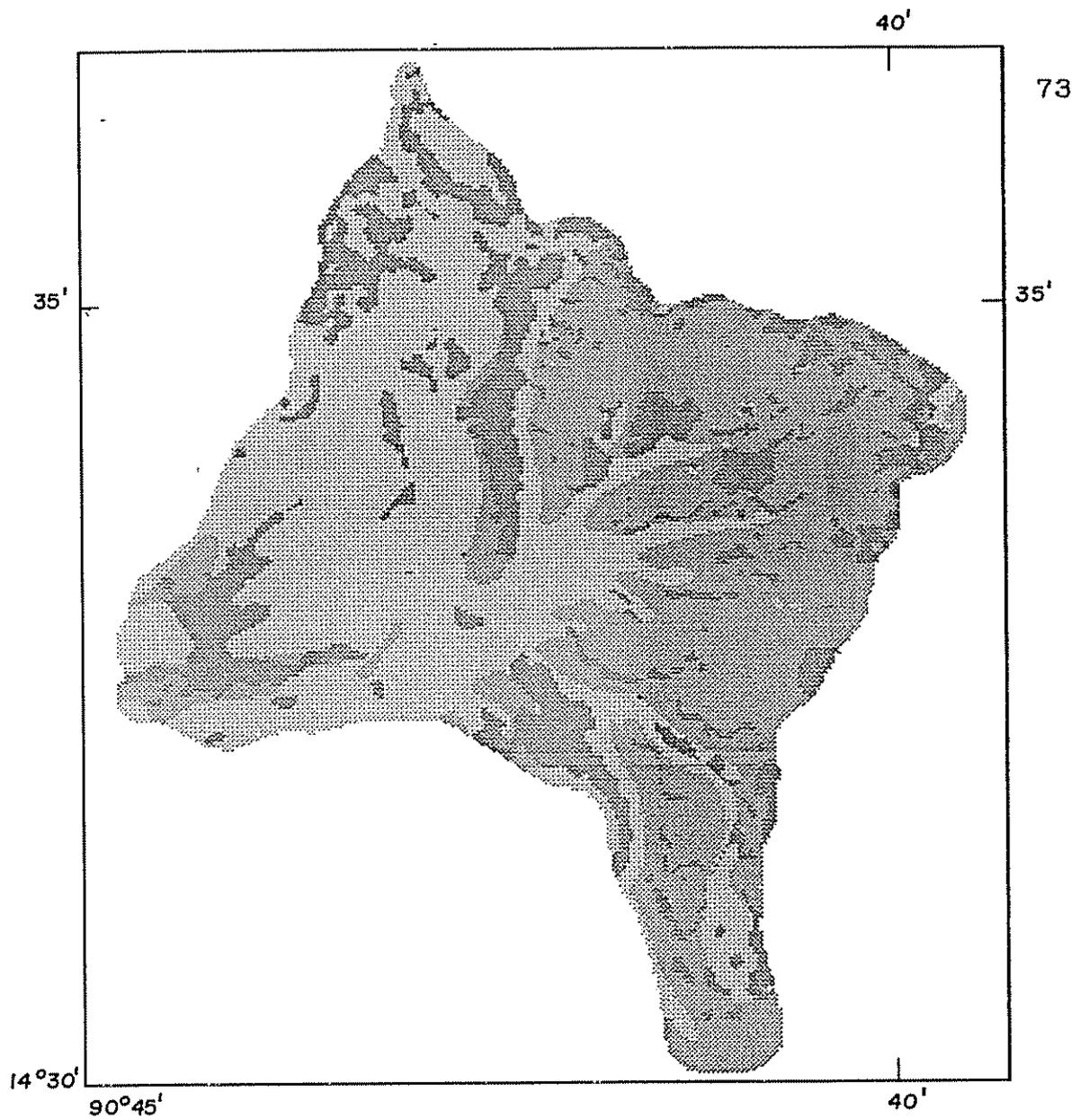


FIGURA 12: Mapa con erosión igual, menor y mayor que el nivel de tolerancia permisible en 1973.

FUENTE: Análisis espacial aplicando un sistema de información geográfico.

AREAS CON:

1. $E = T$

2. $E < T$

3. $E > T$

REFERENCIA



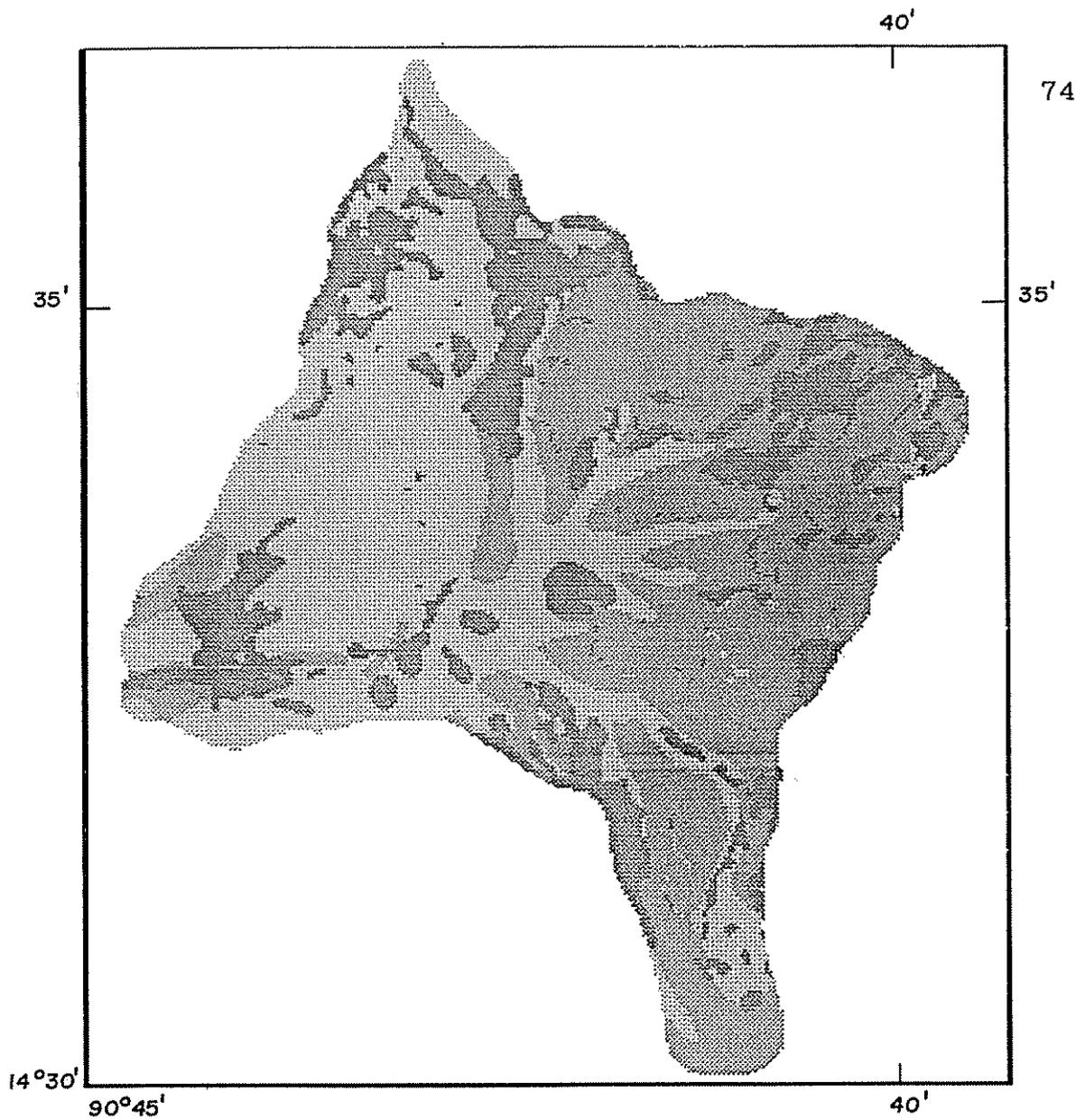


FIGURA 13: Mapa con erosión igual, menor y mayor que el nivel de tolerancia permisible en 1980.

FUENTE: Análisis espacial aplicando un sistema de información geográfico.

AREAS CON:

1. $E = T$

2. $E < T$

3. $E > T$

REFERENCIA



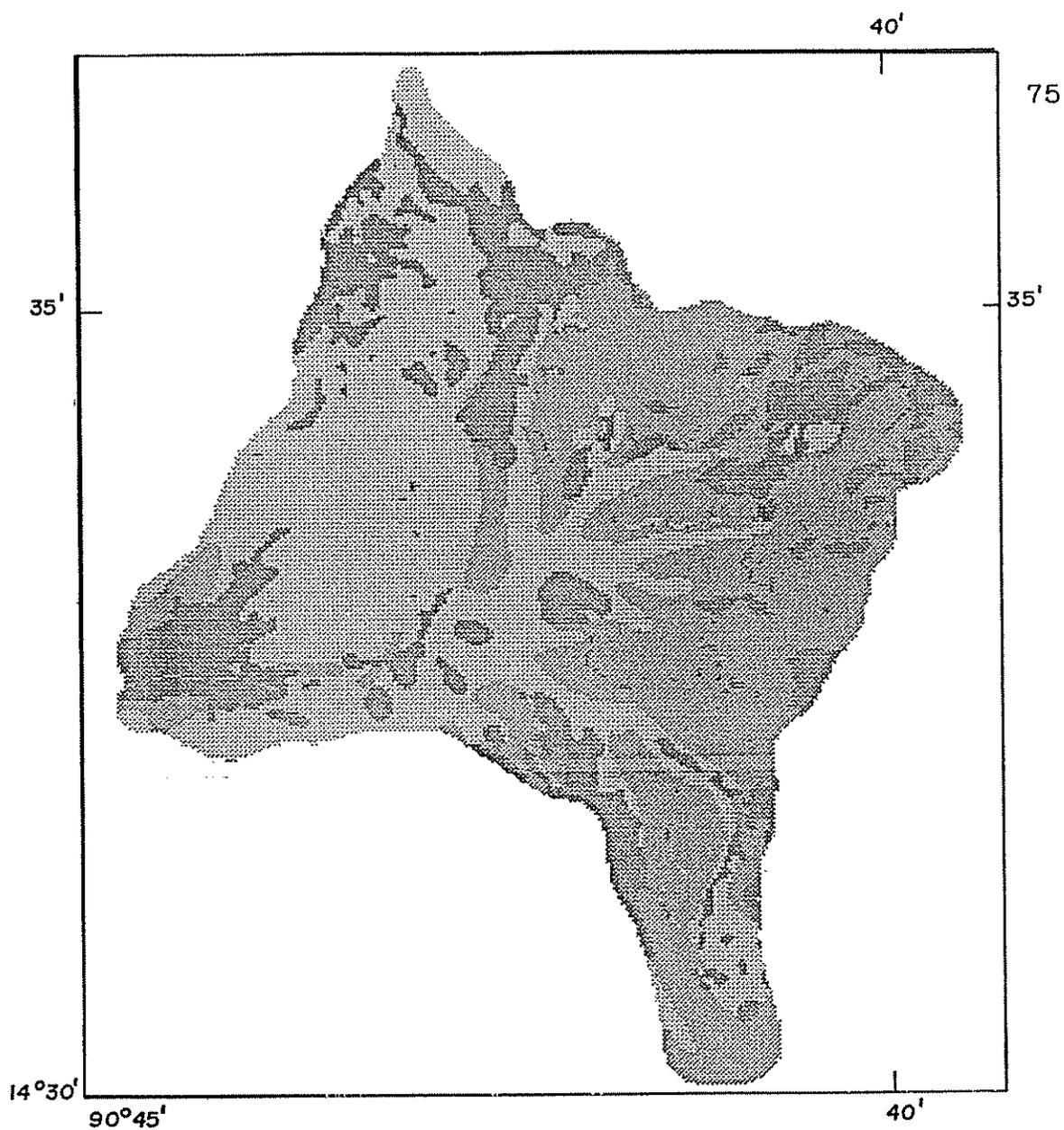


FIGURA 14: Mapa con erosión igual, menor y mayor que el nivel de tolerancia permisible en 1992.

FUENTE: Análisis espacial aplicando un sistema de información geográfico.

AREAS CON:

REFERENCIA

1. $E = T$



2. $E < T$



3. $E > T$



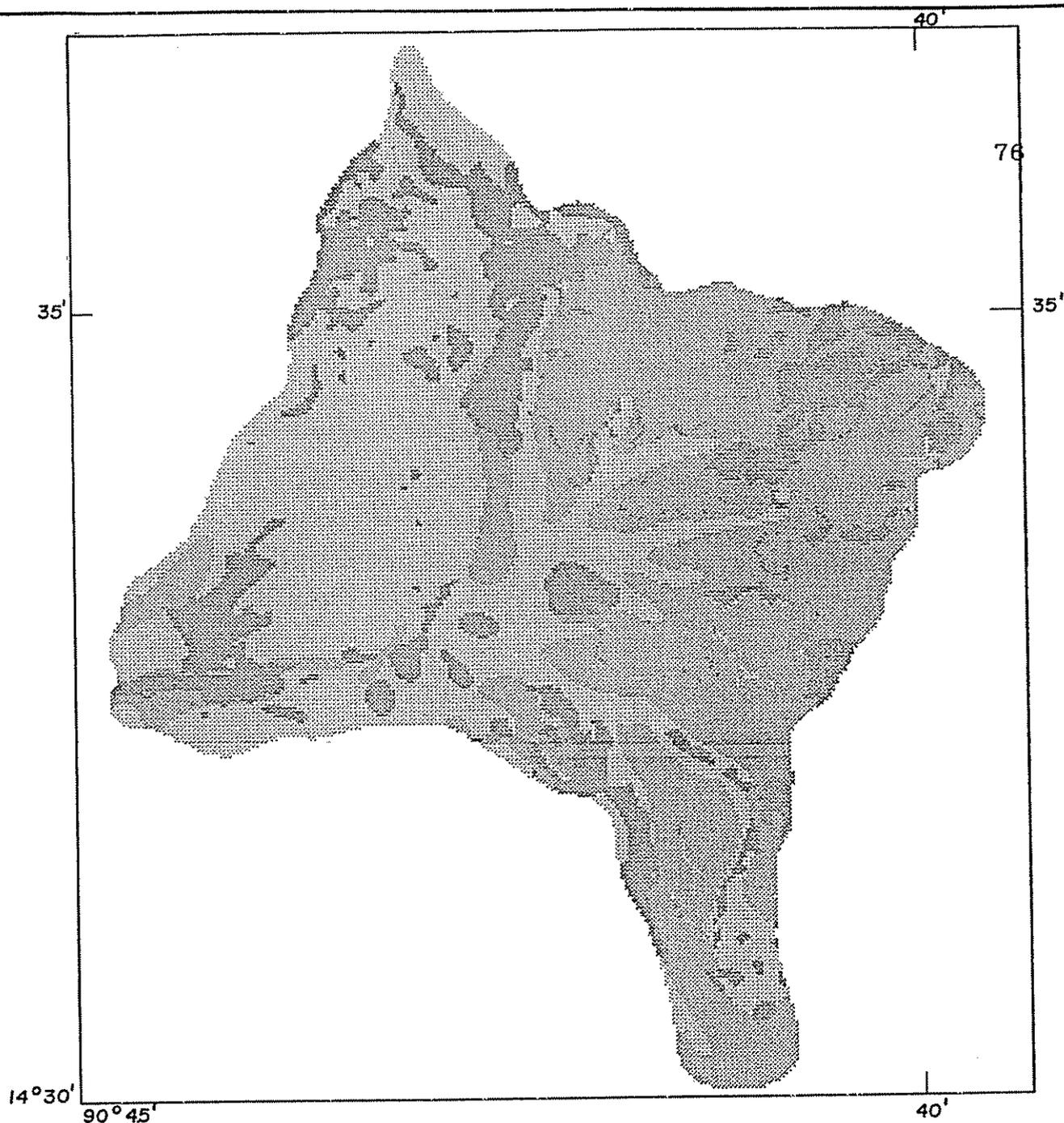


FIGURA 15: Mapa con erosión igual, menor y mayor, que el nivel de tolerancia permisible suponiendo la sustitución de la práctica tradicional por la práctica barreras vivas en 1992.

FUENTE: Análisis espacial aplicando un sistema de información geográfico.

AREAS CON :

REFERENCIA

1. E=T



2. E<T



3. E>T



en otra categoría las áreas con niveles de erosión superiores a los de tolerancia permisible. Este mapa fue combinado con el mapa de suelo y profundidad efectiva, para discriminar, en cada clase de suelo, áreas con niveles de erosión superior al nivel de tolerancia permisible.

En los Cuadro 21, 22 y Figuras 16, 17 18 y 19, se muestra, tanto la cantidad de sedimento que aporta cada suelo como la ubicación espacial. En donde la erosión es superior al nivel de tolerancia puede observarse que las clases de suelo que más se erosionan son Typic Eutrandepts y la Asociación.

El sedimento que aportan en conjunto las diferentes clases de suelo que muestran niveles de erosión iguales o inferiores al nivel de tolerancia en los diferentes años es similar relativamente bajo, y provienen de aproximadamente el 75% del área de la subcuenca (Cuadro 21). El otro 25% del área es el que presenta problemas de erosión y se encuentra distribuido en los diferentes tipos de suelo.

Cuadro 21. Cuantificación de las pérdidas de suelo en áreas que sobrepasan el límite de tolerancia permisible en los los diferentes tipos de suelo.

AÑO	Tipos de Suelo										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11 *
1973	12997.13	16307.82	584.32	7938.80	20289.10	7983.23	1503.19	000.00	750.26	110285.0	1816.84
1980	18675.17	13309.70	000.00	14113.08	22410.72	9307.56	5328.52	122.47	646.90	112856.5	1806.98
1992	16504.22	19484.92	271.86	4697.07	4058.12	4978.67	1466.94	4.56	360.45	75502.88	1495.70
1992-M	15720.08	19045.17	86.71	4352.45	3451.03	4917.56	1298.07	000.00	358.70	66675.66	1588.08

* Categoría de suelo según el Cuadro 3

Cuadro 22. Áreas en porcentaje según clase de suelo que sobrepasan límite de tolerancia permisible, en los diferentes tipos de suelo.

AÑO	Tipos de Suelo										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11 †
1973	4.06	3.11	0.05	1.52	0.89	0.10	0.10	0.00	0.18	11.01	78.12
1980	4.19	3.04	0.00	1.92	1.11	1.05	0.15	0.05	0.17	14.13	74.23
1992	4.64	2.38	0.17	1.63	0.59	1.16	0.09	0.01	0.10	12.40	76.86
1992-M	3.92	2.01	0.01	1.58	0.60	1.08	0.09	0.00	0.95	12.35	78.30

† Categoría de suelo según el Cuadro 3.

4.7. Pérdida de suelo, para periodos de retorno de cinco y diez años

En términos generales, los Cuadros 23, y 24 y las Figuras 20, 21 y 22 muestra una relación directa entre el período de retorno y el incremento en sedimento producido por la erosividad de la lluvia. Ya que las áreas que aportan el sedimento se mantienen más o menos constantes, lo que ocurre es que al aumentar el período de retorno cada área aporta más sedimento.

En los cuadros ya indicados se muestra el sedimento promedio y total que se produce bajo dos períodos de retorno, así como la clasificación de la erosión en niveles de erosión según tolerancia y el sedimento que produciría cada tipo de suelo bajo los períodos de retorno ya indicados. Complementariamente a esto se muestran las áreas en porcentajes de cada categoría.

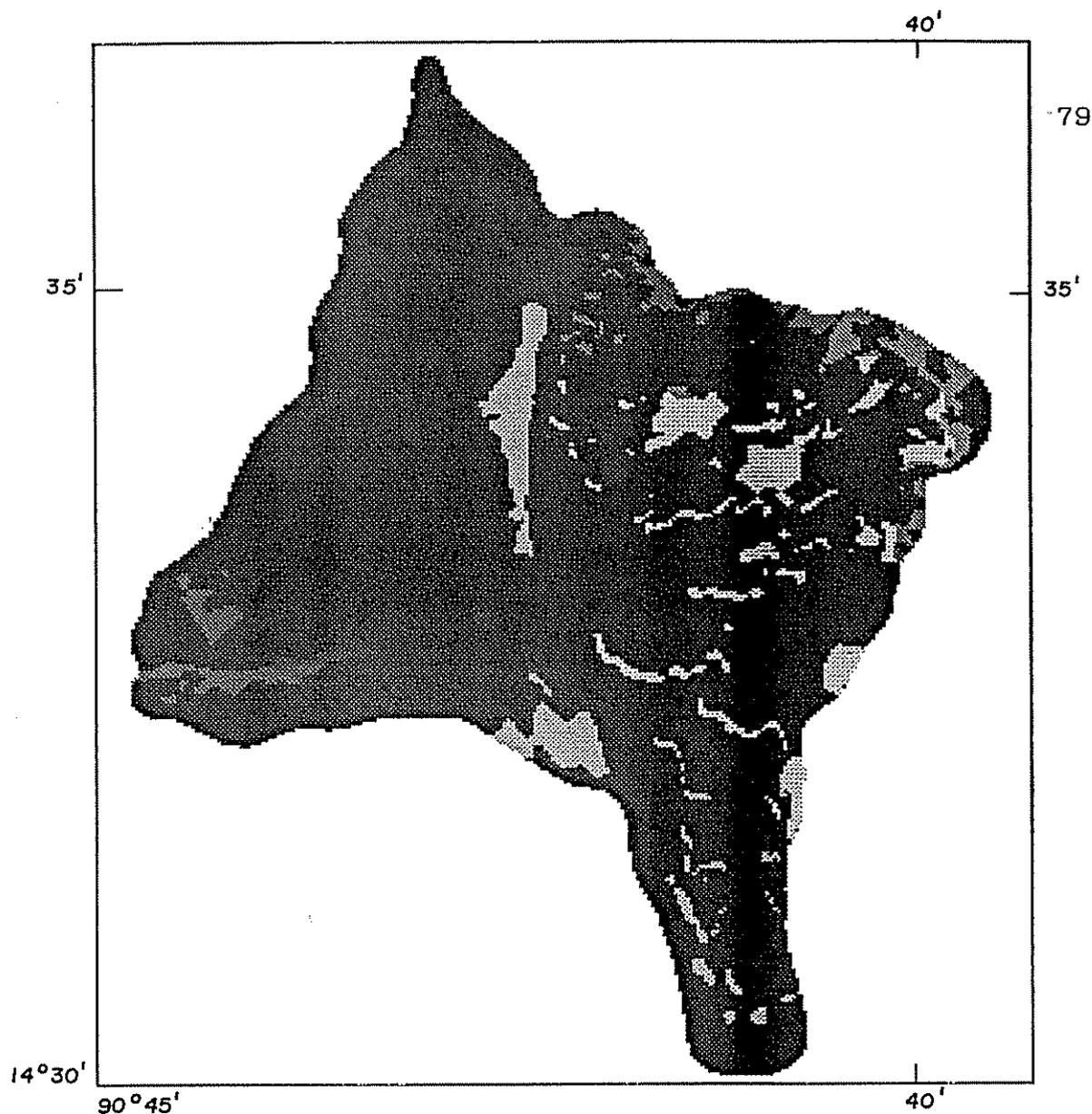


FIGURA 16: Mapa de suelos cuya erosión sobrepasa el límite de tolerancia permisible en 1973.

FUENTE: Análisis espacial aplicando un sistema de información geográfica.

SUELO	PROFUNDIDAD cm	REFERENCIA
1. Typic eutrandepts	90	
2. Typic eutrandepts	51	
3. Typic ustropepts	90	
4. Typic ustropepts	51	
5. Typic vitrandepts	51	
6. Mollic vitrandepts	90	
7. Mollic citrandepts	<44	
8. Fluventic ustipsamments	75	
9. Asociación	<44	
10. Varios *	—	

* Suelos con erosión igual o menor que el nivel de tolerancia permisible.

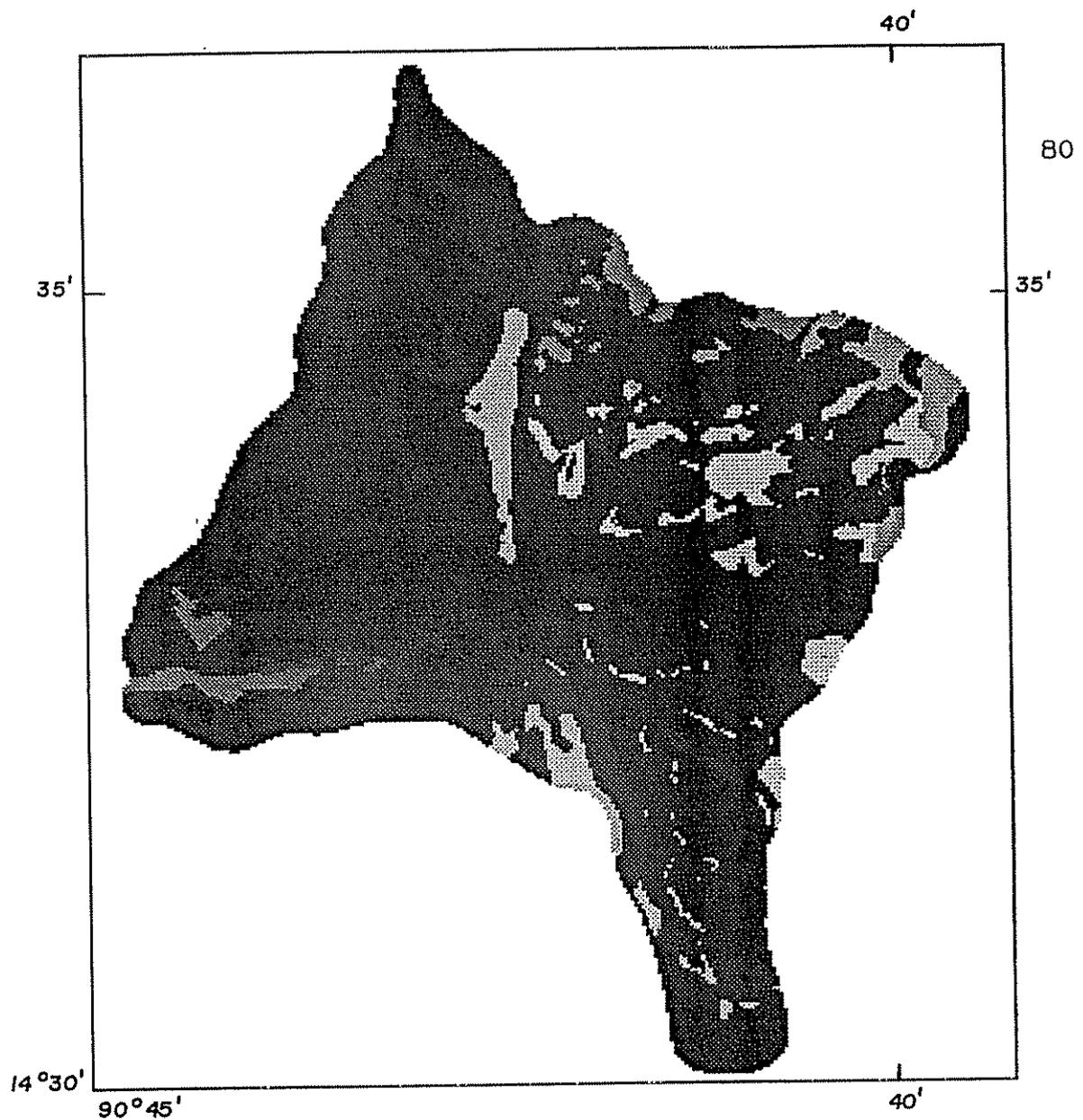


FIGURA 17: Mapa de suelos cuya erosión sobrepasa el límite de tolerancia permisible en 1980.

FUENTE: Análisis espacial aplicando un sistema de información geográfico.

SUELO	PROFUNDIDAD cm	REFERENCIA
1. Typic eutrandepts	90	[Pattern]
2. Typic eutrandepts	51	[Pattern]
3. Typic ustropepts	51	[Pattern]
4. Typic vitrandepts	51	[Pattern]
5. Mollic vitrandepts	90	[Pattern]
6. Mollic vitrandepts	<44	[Pattern]
7. Fluventic ustipsamments	90	[Pattern]
8. Fluventic ustipsamments	75	[Pattern]
9. Asociación	<44	[Pattern]
10. Varios *		[Pattern]

* Suelos con erosión igual o menor que el nivel de tolerancia permisible.

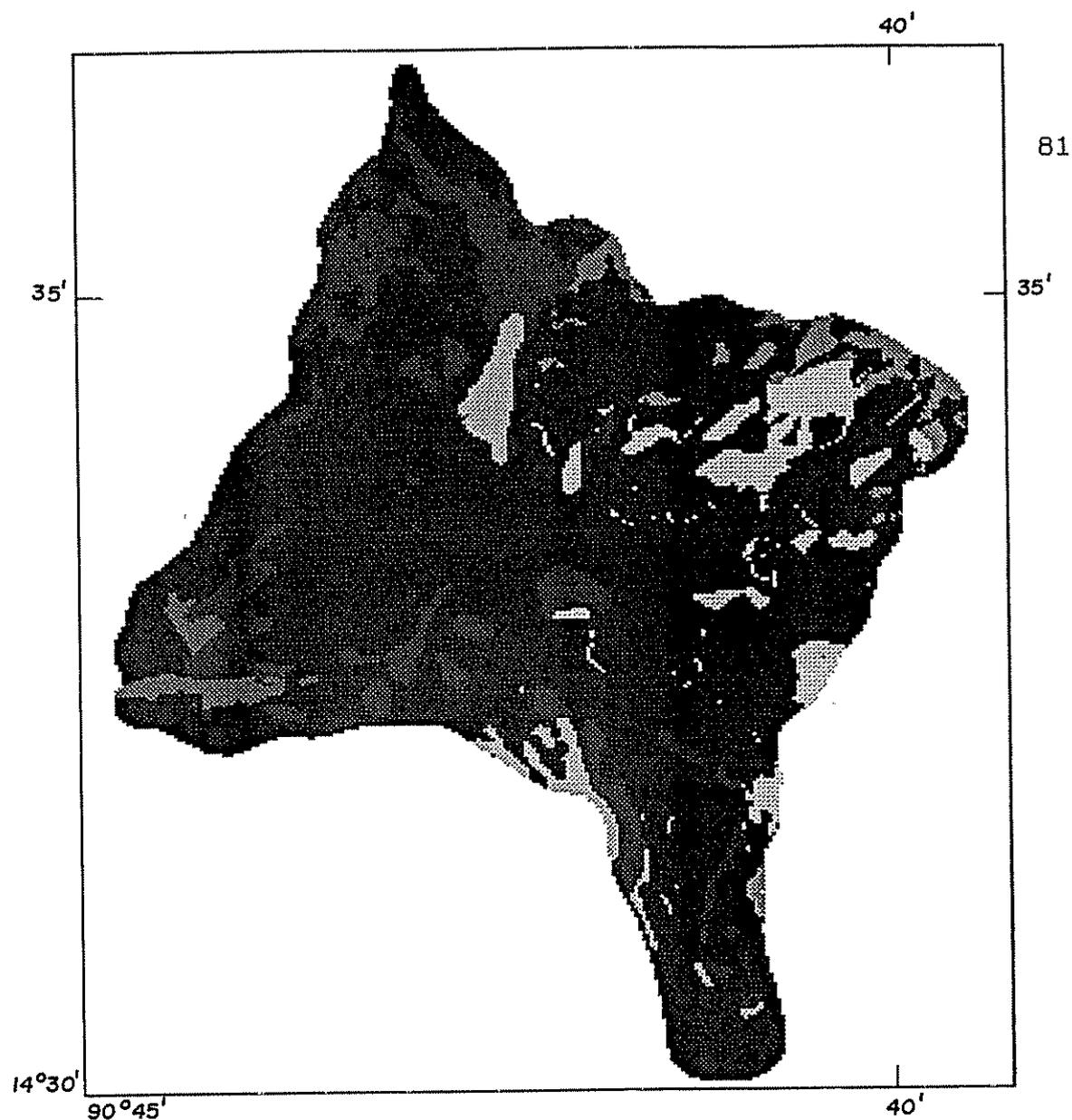


FIGURA 18: Mapa de suelos cuya erosión sobrepasa el límite de tolerancia permisible en 1992.

FUENTE: Análisis espacial aplicando un sistema de información geográfica.

SUELO	PROFUNDIDAD cm	REFERENCIA
1. Typic eutrandepts	90	[Pattern]
2. Typic eutrandepts	51	[Pattern]
3. Typic ustropepts	90	[Pattern]
4. Typic ustropepts	51	[Pattern]
5. Typic vitrandepts	51	[Pattern]
6. Mollic vitrandepts	90	[Pattern]
7. Mollic citrandepts	< 44	[Pattern]
8. Fluventic usptisaments	90	[Pattern]
9. Fluventic usptisaments	75	[Pattern]
10. Asociación	< 44	[Pattern]
11. Varios *	—	[Pattern]

* Suelos con erosión igual o menor que el nivel de tolerancia permisible.

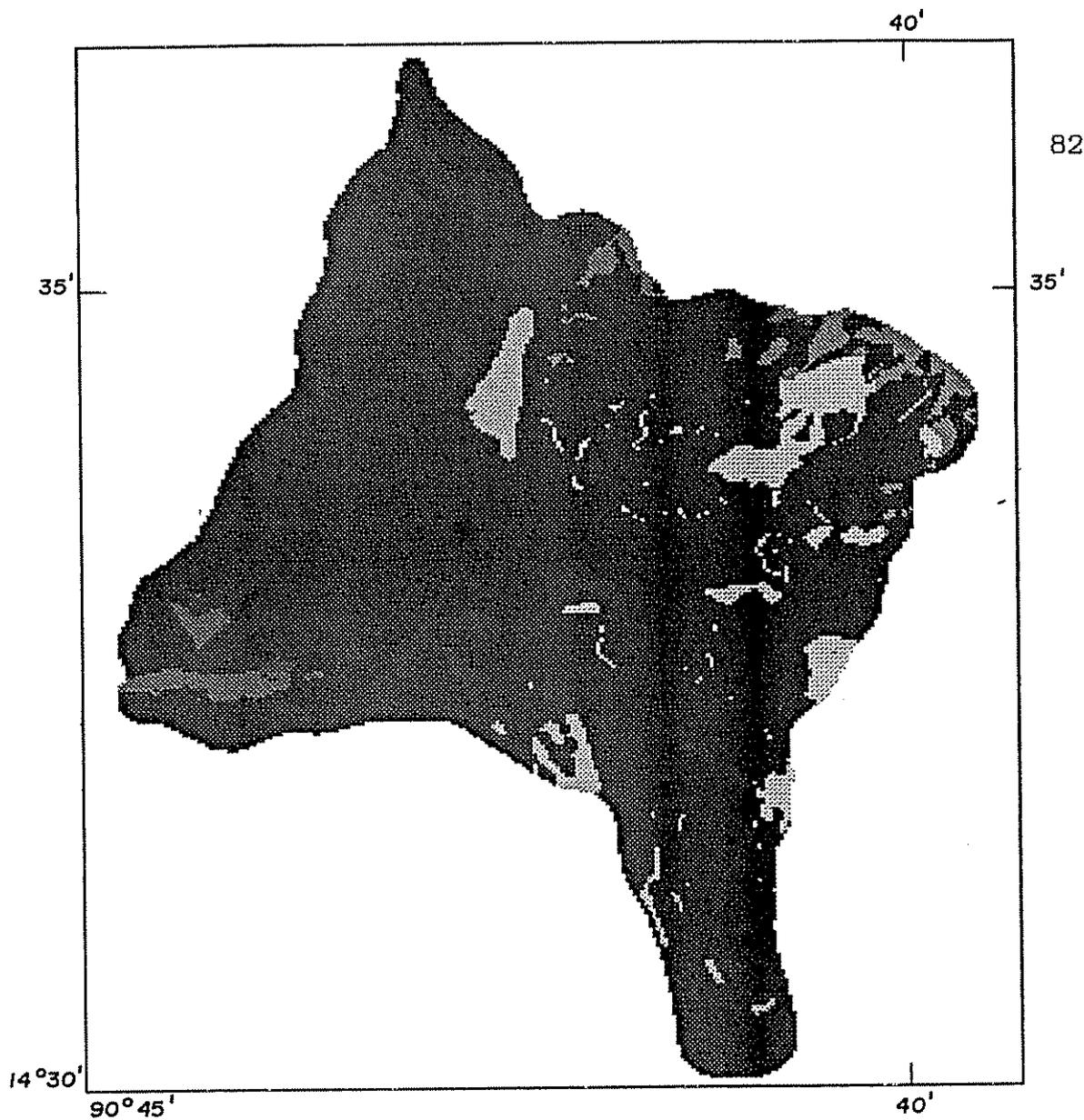


FIGURA 19: Mapa de suelos cuya erosión sobrepasa el límite de tolerancia permisible suponiendo la sustitución de la práctica tradicional por la práctica de barreras vivas en 1992.

FUENTE: Análisis espacial aplicando un sistema de información geográfico.

SUELO	PROFUNDIDAD cm	REFERENCIA
1. Typic eutrandepts	90	□
2. Typic eutrandepts	51	■
3. Typic ustropepts	90	■
4. Typic ustropepts	51	■
5. Typic vitrandepts	51	■
6. Mollic vitrandepts	90	■
7. Mollic citrandepts	44	■
8. Fluventic ustipsamments	75	■
9. Asociación	44	■
10. Varios *	—	■

* Suelos con erosión igual o menor que el nivel de tolerancia permisible.

Cuadro 23. Pérdidas de suelo en t/año para las de las categorías de suelo, variando el factor R.

FACTOR R	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11 †
R _m	16504.22	19484.92	271.86	4697.07	4058.12	9978.67	1466.94	4.56	360.45	75502.88	1495.70
R(t = 5)	21699.83	25650.78	356.29	6206.31	91.71	6946.22	1939.66	6.00	476.98	99546.55	6764.86
R(t = 10)	26183.30	30696.10	425.01	7426.69	6402.03	8343.92	2325.60	7.19	572.12	119195.03	1609.05

† Categoría de suelo según el Cuadro 3

Cuadro 24. Porcentaje del área correspondiente a la pérdida indicada en el cuadro 23

FACTOR R	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11 †
R _m	4.64	2.38	0.17	1.63	0.59	1.16	0.09	0.01	0.10	12.40	76.86
R(t = 5)	4.86	2.42	0.17	1.81	3.83	2.03	0.09	0.01	0.10	12.43	72.29
R(t = 10)	5.39	2.47	0.17	1.81	0.59	2.03	0.09	0.01	0.10	12.43	74.96

† Categoría de suelo, según el Cuadro 3

4.8. Pérdida de suelo en áreas bajo la práctica tradicional comparado con la práctica barrera viva

La práctica tradicional que más aporta sedimento se encuentra bajo cultivos anuales, especialmente el cultivo de maíz, luego en el orden sigue la asociación de maíz con hortalizas y finalmente el cultivo de hortalizas que prácticamente no lo produce. Toda esta producción de sedimento esta muy asociada al porcentaje de área que ocupa cada cultivo.

Los Cuadros 25, 26 muestran la cantidad de sedimento que aporta cada cultivo bajo las prácticas tradicional y suponiendo la implantación de barreras vivas, en las áreas respectivas.

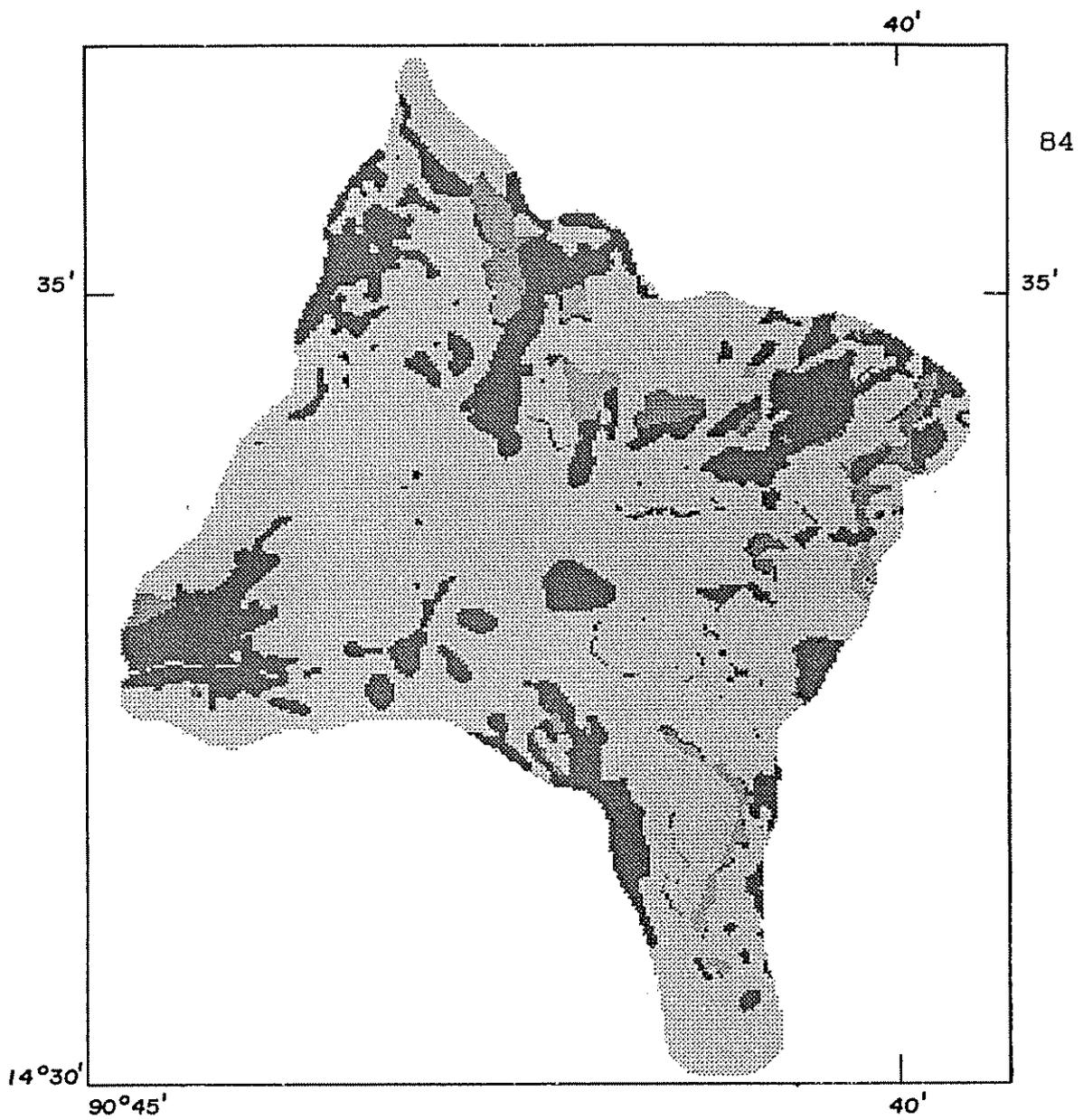


FIGURA 20: Mapa de rangos de erosión en to/ha de la subcuenca del río Pensativo suponiendo una precipitación con período de retorno de cinco años.

FUENTE: Análisis espacial aplicando un sistema de información geográfico.

RANGOS DE EROSION EN to/ha

1. 0-2
2. 2-4.5
3. 4.5-9.5
4. 9.5-11
5. >11

REFERENCIA



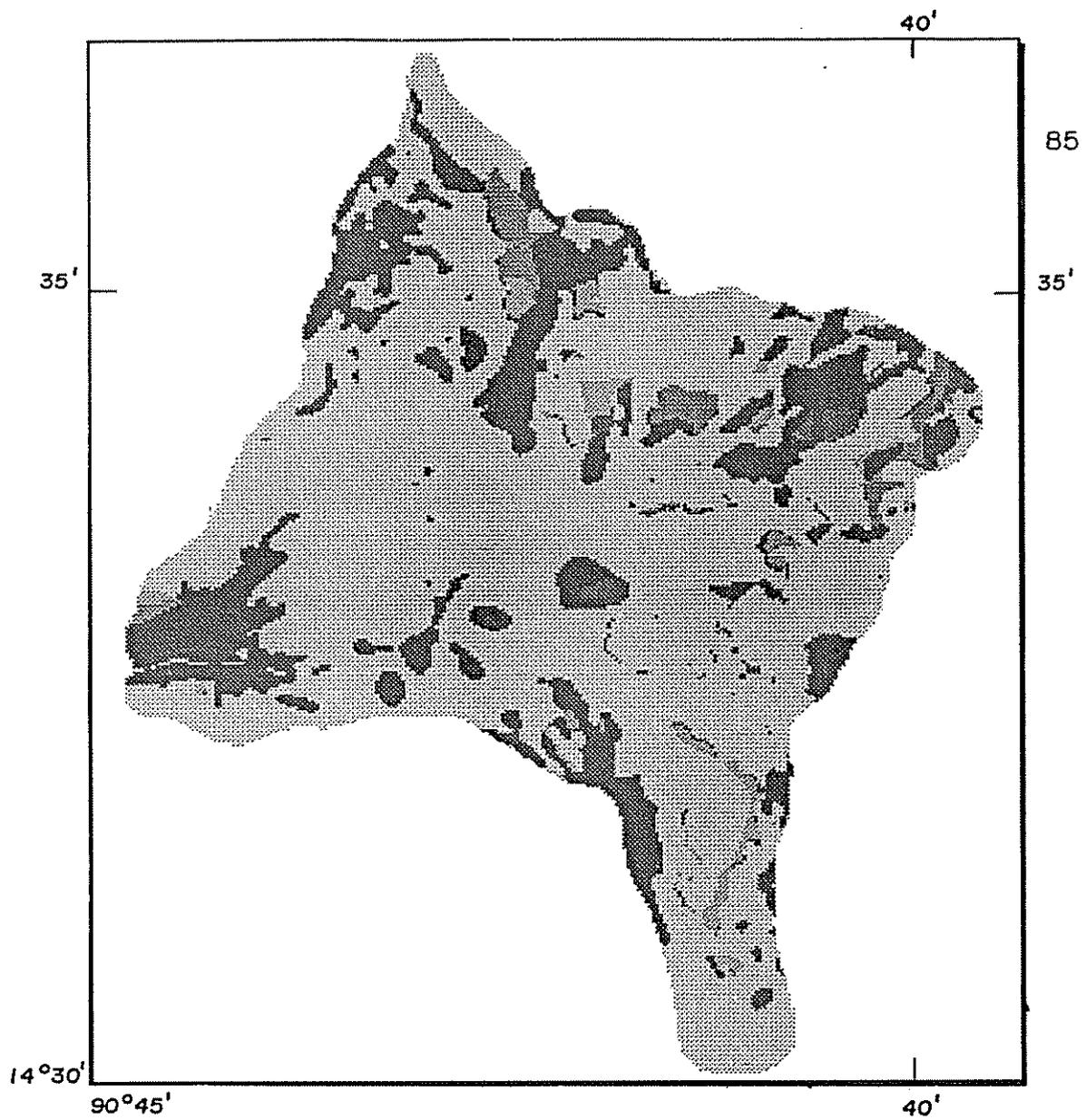


FIGURA 21 : Mapa de rangos de erosión en to/ha de la subcuenca del río Pensativo suponiendo una precipitación con período de retorno de diez años.

FUENTE : Análisis espacial aplicando un sistema de información geográfico.

RANGOS DE EROSION EN to/ha

REFERENCIA

1. 0-2



2. 2-4.5



3. 4.5-9.5



4. 9.5-11



5. >11



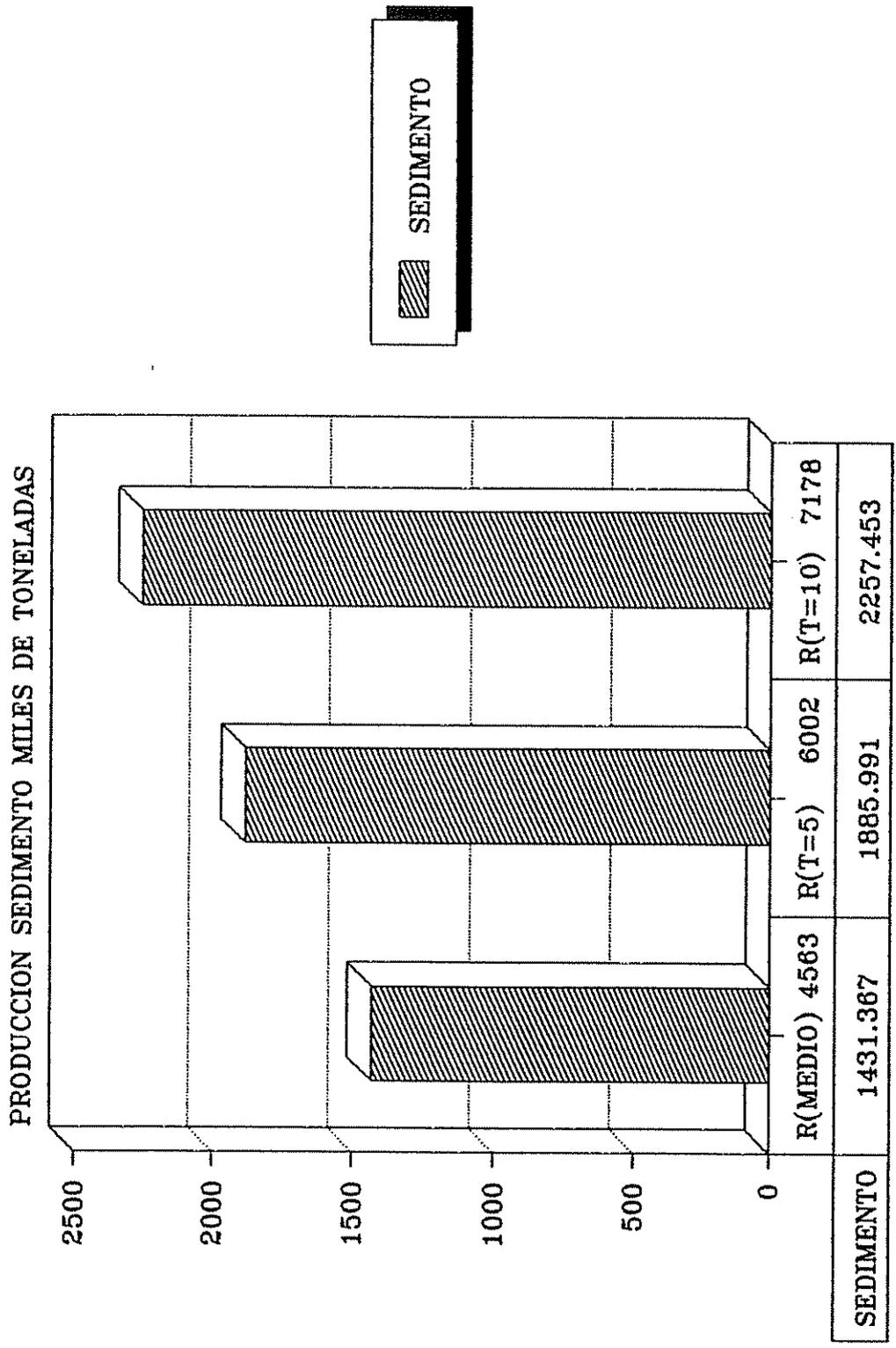


Figura 22. Efecto de 2 Pérlod. retorno en la Prod. sedlmeto
 FACTOR R EN MJ.mm/ha/h-año

Cuadro 25. Cuantificación de las pérdidas de suelo en áreas bajo la práctica tradicional y suponiendo la implantación de la práctica barrera viva.

Cultivo	Pract. tradicional	Pract. barrera viva	Diferencia
Hortalizas	72.50	11.45	61.05
Cult. anuales	7717.70	1550.05	6167.65
Maíz-hortalizas	5716.96	752.64	4964.32

Cuadro 26. Porcentaje de áreas agrícolas bajo la práctica tradicional

Cultivo	Area en porcentaje
Hortalizas	0.16
Cultivos anuales	5.44
Maíz-hortalizas	4.41

4.9. Estimación de costos

4.9.1 En la implantación de una práctica conservación

Tomando como base el costo por hectárea que conlleva la implantación de la práctica de conservación acequia con barrera viva reportado en el análisis económico de Rosado P; Barrientos C. y Lima L (1992), se puede establecer en forma muy aproximada la cantidad de dinero necesaria para rehabilitar la subcuenca del río Pensativo. Debido a que no existen costos disponibles para la práctica modelada, se supuso que éste es equivalente a un 50% del costo que reportan los autores indicados anteriormente, lo que asciende a la suma de Q. 500.00 o sea más o menos \$ 100.00.

En el Cuadro 27 se muestra el área de los cultivos bajo la práctica tradicional y el costo por hectárea para implantar la práctica de conservación de suelo barrera viva.

Como puede observarse la mayor parte del área sin prácticas de conservación de suelo esta destinada al cultivo de maíz. Esto pone de manifiesto, el efecto que causan los precios sobre la conservación del recurso suelo, explicando el por qué el cultivo de hortalizas se encuentra casi en su totalidad bajo prácticas de conservación de suelo

Cuadro 27. Estimación de costos de sustitución de la práctica tradicional por la práctica barrera viva en \$.

Cultivo	Sup. ha	Costo/ha en \$	Costo/cultivo
Hortalizas	4.86	100	486.00
Cultivos anuales	160.11	100	16011.00
Maíz-hortalizas	113.04	100	11304.00
Total.....		\$	27801.00

4.9.2 Por remoción de sedimento

Tomando en consideración observaciones hechas en la parte baja de la subcuenca, en relación al tiempo y los recursos que anualmente se invierten para la remoción de sedimento, se ha el costo que a continuación se indica.

La excavadora observada duro un promedio de una hora para remover sedimento a lo largo de 25 metros lineales, abriendo una zanja de dos metros y medio por de ancho por tres de profundidad, lo que da un volumen de 187.5 metros cúbicos de sedimento. Para transportar éste sedimento se requiere de más o menos veinte camiones. Asumiendo que un camión de carga es capaz de transportar entre ocho y diez

metros cúbicos. El costos aproximado que cobraría cada camión (costo considerando una distancia de hasta 10 kms. en cada viaje) es de \$ 20.00 (Q. 100.00), por otra parte si se contratarán los servicios de una maquinaria pesada como la que actualmente dispone la Dirección General de Caminos costaría aproximadamente \$ 60.00 la hora (Q. 300.00).

Multiplicando 20 camiones por \$ 20.00 más \$ 60.00 de la excavadora dan un costo total de \$ 460.00 para remover 187.5 metros cúbicos, o sea cada metro cúbico que se remueve tiene un costo de \$ 0.40 (Q. 2.00).

Tomando en cuenta información proporcionada por el personal encargado de remover el sedimento, en cuanto a la distancia que anualmente se draga y sobre draga, se ha estimado que son aproximadamente 7 kilómetros (la distancia de dragado es 1.5 a 1.6 kmt que inicia frente a la estación de Policía hasta la entrada de la Ciudad de Antigua Guatemala).

Por lo tanto el costo aproximado para remover el sedimento es de aproximadamente de \$ 21,000.00 (Q 105000.00)

4.10. A nivel de parcelas de escorrentía

4.10.1. Sedimento

El análisis de varianza para la variable sedimento muestra diferencias altamente significativas en la interacción de práctica * cultivo. Con base en la prueba t se deduce que, desde el punto de vista de la conservación de suelo, las prácticas que son más efectivas para el control de la erosión son acequia con barrera viva, barrera viva, y acequia con camellones en contorno, cuando el cultivo es

frijol. Para el cultivo de maíz las prácticas que más reducen la erosión son acequia con barrera viva y acequia con camellones en contorno.

Las pérdidas de suelo que ocurren en camellones en contorno bajo el cultivo de frijol, equivalen a las pérdidas de suelo que suceden en la práctica de barrera viva cuando se cultiva maíz. La práctica tradicional bajo cultivo de maíz es en la que ocurren las mayores pérdidas de suelo por efecto de la erosión hídrica.

En los cuadros 28, 29 y Figura 23 se muestra el análisis de varianza y la prueba t para los promedios.

Cuadro 28. Análisis de varianza para el sedimento ocurrido en cultivos de maíz y frijol, ajustado por Intensidad máxima.

Fuente de Variación	GL	SC	CM	F	Pr > F
Repetición	4	0.39	0.10	0.61	0.65 NS
Práctica conservación	3	23.18	7.73	48.92	0.0001 **
Cultivo	1	7.61	7.61	48.19	0.0001 **
Práctica*cultivo	3	8.73	2.91	18.43	0.0001 **
Intensidad máxima	1	6.73	6.73	42.62	0.0001 **
Error	67	10.58	0.16		
Total	79	53.69072777	CV= 63.53%		

Cuadro 29. Prueba de medias para la variable sedimento, en los cultivos de maíz y frijol, según prácticas de conservación de suelo.

Práctica de conservación	Cultivo	Sedimento en t/ha.	
Acequia con barrera viva	Frijol	0.14930220	A
Barrera viva	Frijol	0.16330220	A
Acequia con camellones en contorno	Frijol	0.20130220	A
Acequia con barrera viva	Maíz	0.23864780	A
Acequia con camellones en contorno	Maíz	0.27232780	A
Práctica tradicional	Frijol	0.68230220	B
Barrera viva	Maíz	0.92327780	B
Práctica Tradicional	Maíz	2.37403780	C

Prácticas y cultivos con igual letra indican que no hay diferencias significativas entre ellos, para la variable sedimento.

4.10.2. Escorrentía

El Cuadro 30 muestra que la interacción de práctica por cultivo es altamente significativa; esto significa que los niveles de escorrentía observada dependen del efecto conjunto de práctica y cultivo.

En el Cuadro 31 y Figura 24 se confirma que el cultivo de maíz bajo la práctica tradicional permite los mayores niveles de escorrentía, y que el cultivo de frijol bajo la misma práctica muestra la misma tendencia aunque en menor cuantía.

En ambos cultivos, la práctica en la que se observan los menores valores de escorrentía es la acequia con barrera viva.

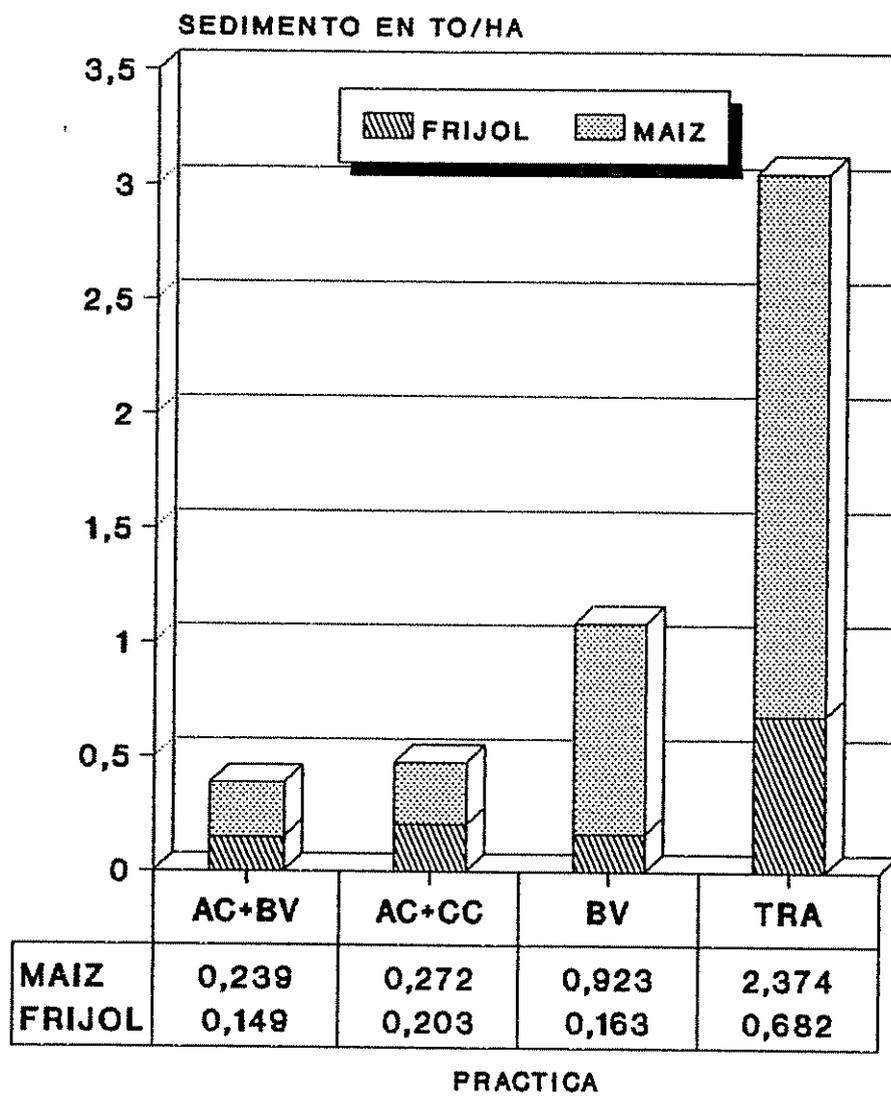


Figura 23. Pérdidas de suelo según práctica y cultivo

Cuadro 30. Análisis de varianza para la variable escorrentía, en los cultivos de maíz y frijol bajo cuatro prácticas de conservación de suelo, ajustado por la intensidad máxima.

Fuente de variación	GL	SC	CM	F	Pr > F
Repetición	4	885.21	221.30	1.26	0.29 NS
Práctica de conservación	3	58533.68	19511.23	111.35	0.0001 **
Cultivo	1	96356.85	96356.85	549.90	0.0001 **
Práctica*cultivo	3	45764.88	15254.96	87.06	0.0001 **
Intensidad máxima	1	20236.90	20236.90	115.49	0.0001 **
Error	67	11740.12	175.23		
Total	79	215114.6301	CV=31.32%	r ² = 0.945	

A continuación se muestra una comparación de medias según tratamiento y cultivo.

Cuadro 31. Prueba de medias para la variable escorrentía superficial en los cultivos de maíz y frijol según prácticas de conservación de suelo.

PRÁCTICA DE CONSERVACIÓN	CULTIVO	ESCORRENTÍA MEDIA EN mt ³ /ha
Práctica tradicional	Maíz	142.42 A
Barrera viva	Maíz	115.69 B
Acequia con camellones en contorno	Maíz	30.24 C
Acequia con barrera viva	Maíz	27.66 C
Práctica tradicional	Frijol	11.16 D
Barrera viva	Frijol	5.51 D
Acequia con camellones en contorno	Frijol	3.55 D
Acequia con barrera viva	Frijol	1.91 D

Prácticas y cultivos con la misma letra indican que no hay diferencias significativas, según prueba "t"

En el cultivo de maíz la escorrentía es mayor a la que ocurre en el cultivo de frijol. Esta diferencia puede deberse entre otros factores al sistema de labranza del suelo que se utiliza en cada cultivo, a la diferencia de desarrollo de los cultivos, a la diferencia en cobertura que expone cada cultivo, al sistema radicular, a la diferencia

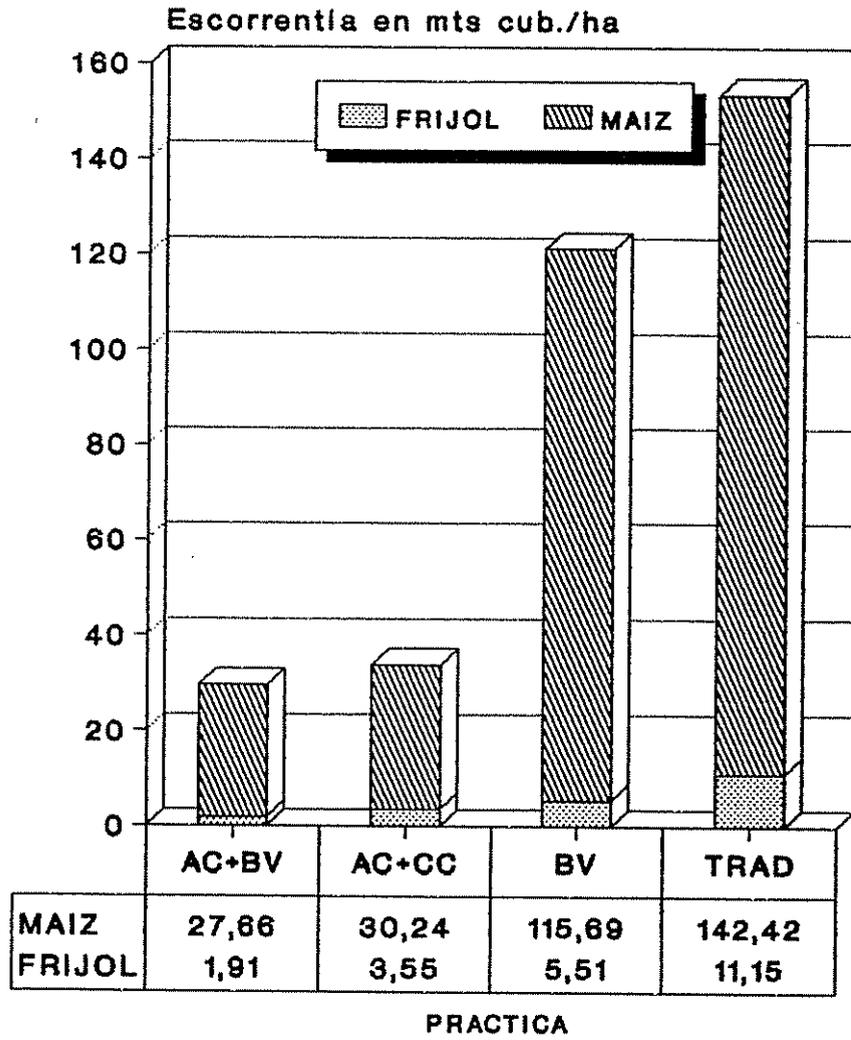


Figura 24. Niveles de escorrentía según práctica y cultivo

de alturas entre las plantas de maíz y frijol y al ciclo del cultivo

4.10.3. Carga sólida específica

Aún cuando las prácticas de conservación en el cultivo de maíz permiten que se escurra el mayor volumen de agua, es importante observar (Cuadros 32, 33 y la Figura 25) que las diferencias significativas en la interacción práctica por cultivo y la cantidad en gramos por litro, no son de la misma magnitud que la escorrentía, más bien presentan una tendencia contraria a la que manifiesta la escorrentía, por cuanto es el cultivo de frijol en donde se observan los valores más altos.

Esto implica que en las evaluaciones de pérdida de suelo deben considerarse tanto los valores de escorrentía y de concentración de sólidos (carga sólida específica), por cuanto que en la evaluación hecha, se observa que las prácticas de conservación en el cultivo de maíz tienden a permitir el paso del agua pero favorecen el proceso de deposición, o sea las prácticas tienen la función de un filtro, tal como lo manifestó la práctica barrera viva en el cultivo de maíz y frijol.

Cuadro 32. Análisis de varianza para la carga sólida específica ocurrida en el cultivo de maíz y frijol bajo cuatro prácticas de conservación de suelo, ajustado por la precipitación.

Fuente de variación	GL	SC	CM	F	Pr > F
Repetición	4	0.00021698	0.00005425	0.86	0.4900
Práct. de conserv.	3	0.00253762	0.00084587	13.45	0.0001 **
Cultivo	1	0.01960058	0.01533149	311.64	0.0001 **
Práctica*cultivo	3	0.00055957	0.00018652	2.97	0.0382 *
Precipitación	1	0.00429128	0.00429128	68.23	0.0001 **
Error	67	0.00421395	0.00006289		

En el cuadro anterior se puede observar las diferencias altamente significativas entre prácticas de conservación de suelo, cultivos y diferencias significativas en la interacción práctica por cultivo, ajustadas por la covariable precipitación.

A continuación se presenta una comparación de medias de la interacción práctica por cultivo aplicando una prueba "t".

Cuadro 33. Comparación de mediar para la variable carga sólida específica, en los cultivos de maíz y frijol según prácticas de conservación de suelo, ajustado por la precipitación.

Práctica de conservación	Cultivo	Concentración en gr sedimento/litro
Barrera viva	Maíz	0.00322208 A
Acequia con barrera viva	Maíz	0.00407948 B
Acequia con camellones en contorno	Maíz	0.00437809 C
Práctica tradicional	Maíz	0.01201425 D
Barrera viva	Frijol	0.02934069 E
Acequia con barrera viva	Frijol	0.03930827 D
Acequia con camellones en contorno	Frijol	0.04240204 F
Práctica tradicional	Frijol	0.05191044 G

4.10.4. Rendimiento

El Cuadro 34 indica que las prácticas de conservación de suelo no tienen efecto sobre el rendimiento observado en los cultivos de maíz y frijol; o sea independientemente de la práctica de conservación, bajo la que se encuentren los cultivos de maíz y frijol, el rendimiento de dichos cultivos no mostraron diferencias durante los cuatro años de evaluación. Esto significa que aunque las prácticas de conservación evaluadas sí reducen los niveles de sedimento y

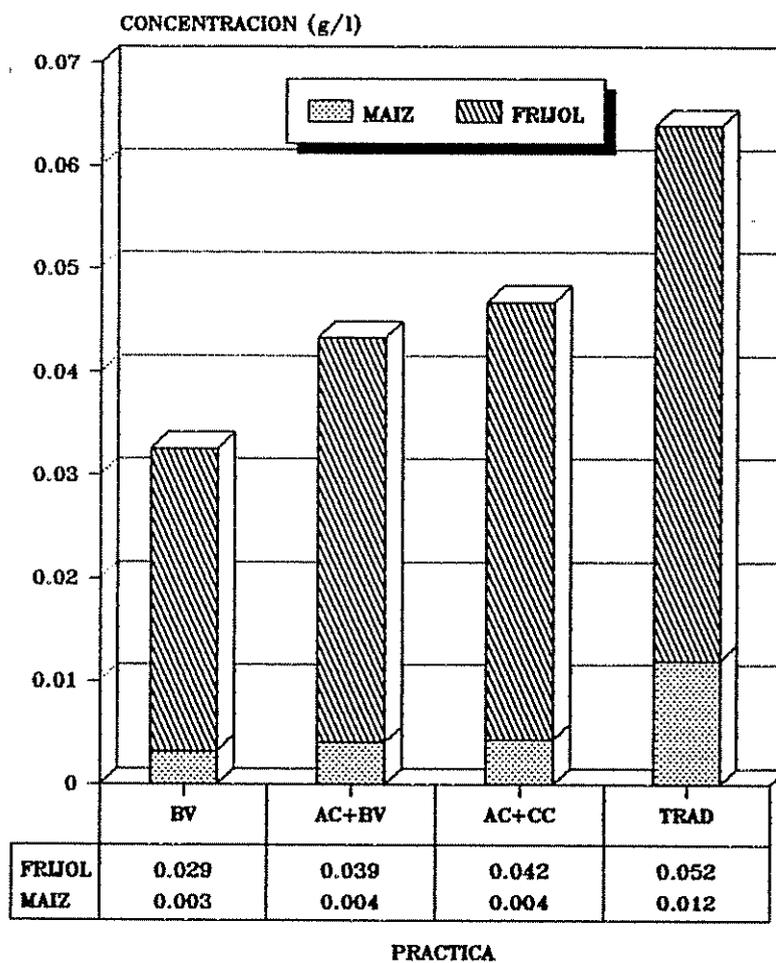


Figura 25. Carga sólida específica según práctica y cultivo.

escorrentía, no tienen efecto sobre el rendimiento, lo que puede atribuirse a que el rendimiento no sólo es función de la pérdida de suelo, sino que existen otras variables como los niveles de fertilización, porcentaje de materia orgánica y otros aspectos tecnológicos que pueden enmascarar los efectos de la pérdida de suelo.

Cuadro 34. Análisis de varianza para el rendimiento de los cultivos de maíz y frijol bajo cuatro prácticas de conservación de suelo, ajustado por la intensidad máxima.

Fuente de variación	GL	SC	CM	F	Pr > F
Repetición	4	9522739.67	2380684.92	5.49	0.0007
Práct. de conserv.	3	2038838.95	679612.98	1.57	0.2056 NS
Cultivo	1	69257754.28	69257754.28	159.67	0.0001 **
Práctica*cultivo	3	379549.00	126511.33	0.29	0.8313 NS
Intensidad máxima.	1	43755151.34	43755151.34	100.88	0.0001 **
Error	67	29061044.80	433746.90		
Total	79	208092901.60	CV: 22.65%		

En Cuadro 35 se puede apreciar el promedio en rendimiento de los cultivos de maíz y frijol bajo las prácticas de conservación evaluadas, en las condiciones del experimento.

Cuadro 35. Rendimiento promedio de los cultivos maíz y frijol bajo cuatro prácticas conservación de suelo.

Cultivo	Rendimiento Promedio en kg/ha
Maíz	3892.34
Frijol	1922.51

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos se plantean las siguientes conclusiones y recomendaciones.

De la aplicación de la USLE a nivel de la subcuenca del río Pensativo:

Los valores de la interacción de los factores práctica de conservación y cultivo son sumamente bajos si se comparan con los valores que se reportan en la literatura. Esto explica el por qué, en la mayoría de los casos, las estimaciones de pérdidas de suelo aplicando la USLE sobreestiman las pérdidas reales. Por lo tanto es necesario utilizar la información de parcelas de escorrentía para estimar la interacción de los factores cobertura y prácticas de conservación. Además es evidente la necesidad de calibrar la ecuación universal de pérdida de suelo a condiciones tropicales.

El análisis estadístico de los factores CP demuestra que existe un efecto de interacción benéfico de protección contra el proceso de erosión hídrica, entre la cobertura de los cultivos y las prácticas de conservación. Esto implica que los valores de las prácticas de conservación en la ecuación universal de pérdida de suelo deben variar según el cultivo y no como se presenta en la mayoría de tablas reportadas en la literatura.

Las cantidades de sedimento, obtenidas con la ecuación universal de pérdida de suelo, sobreestiman la cantidad de sedimento que anualmente se remueve del cauce del río; esto puede atribuirse a que la USLE no está calibrada para condiciones tropicales y también al hecho de no considerar

los procesos de deposición que ocurren antes que el sedimento llegue a los cauces naturales para ser transportado a la parte baja de la subcuenca.

Las pérdidas de suelo estimadas con la USLE en las diferentes clasificaciones que se hicieron, mostraron valores muy similares en los diferentes años, pese a la diferencia en tiempo entre los períodos analizados. Esto significa que para la evaluación de las pérdidas de suelo a nivel de cuenca aplicando la ecuación universal de pérdida de suelo, no necesariamente se debe contar con información reciente (uso de la tierra), especialmente si en la cuenca a estudiar los cambios en el uso de la tierra no ha cambiado significativamente.

Los suelos que reportan las mayores pérdidas de suelo son a) Typic eutrandedpts con profundidades de 0.90 y 0.51 metros y la asociación (Enthic eutrandedpts con Lithic Ustorhents) con profundidad promedio de 0.31 metros.

Anualmente se gasta en remover el sedimento una cantidad equivalente al 75% de lo que costaría sustituir la práctica tradicional por la práctica de barrera viva, en áreas de la subcuenca. Por lo tanto, un porcentaje de los costos de remoción de sedimento, debiera destinarse para, asesoría técnica, pago de subsidios, e implantación de prácticas de conservación en áreas bajo la práctica tradicional, esto reduciría el nivel de sedimento producido cada año.

Las áreas bajo cultivos no son las principales aportadoras de sedimento, ya que cuando se hizo la modelación, la producción de sedimento únicamente se redujo en aproximadamente un 10%, por lo tanto se puede inferir que

otras áreas como cortes de áreas totalmente expuestas, y los caminos son las áreas que aportan las mayores cantidades. Por lo tanto debe hacerse una evaluación de la cantidad de sedimento aportado por dichas áreas. Un porcentaje relativamente bajo del área de la subcuenca es el que aporta la mayor cantidad de sedimento.

La pendiente y profundidad efectiva del suelo muestran una relación inversa lo que explica el por qué áreas con suelo superficiales, son las que aportan la mayor cantidad de sedimento.

Las áreas de cultivo ubicadas al norte, la cumbre de San Mateo a la aldea San Mateo Milpas Altas, El Rejón, Vuelta Grande, Agua Colorada; al noroeste, los cerros el Narizón y el Piñón; al suroeste, las áreas de San Miguel Milpas altas; al noreste, los cerros El Astillero y La Libertad y todos los poblados independientemente de su ubicación fueron identificados como áreas cuyo nivel de erosión sobrepasa el límite de tolerancia permisible.

Del análisis de la información de las parcelas de escorrentía.

El análisis de los resultados de las prácticas de conservación de suelo en parcelas de escorrentía durante los cuatro años evaluados mostraron un efecto benéfico sobre el control de la erosión pero no en rendimiento, en los cultivos de maíz y frijol. Cuando la escorrentía es alta, ello no implica que la concentración de sólidos en el agua sea alta, de manera que para evaluaciones de prácticas de conservación de suelo, debe considerarse, tanto la escorrentía como la variable carga sólida específica.

Aún cuando las prácticas de conservación en el cultivo de maíz, permiten grandes volúmenes de escorrentía, es importante observar que la cantidad gramos por litro no es de la misma magnitud y su tendencia es contraria; por cuanto el cultivo de frijol es en el que se observan los valores más altos.

Con base en la prueba t se estableció que las prácticas acequia con barrera viva, barrera viva y acequia con camellones en contorno en el cultivo de frijol, mostraron las menores pérdidas de suelo. Para el cultivo de maíz, las prácticas que reportaron la menores pérdidas de suelo fueron barrera viva y acequia con barrera viva. Estos resultados obedecen en ambos casos al hecho de que la barrera viva funciona como filtro permitiendo el paso de agua pero favoreciendo la deposición. Aunque éste resultado es más evidente en el cultivo de maíz.

La práctica tradicional en ambos cultivos reporta los valores mayores de pérdida de suelo, aunque en menor cuantía en el cultivo de frijol. Esto se atribuye al hecho que dicha práctica no cuenca con un mecanismo que permita reducir los niveles de escorrentía y sedimento como el que tienen las otras prácticas evaluadas.

De la metodología:

El sistema de información geográfico, permitió aplicar con facilidad la ecuación universal de pérdida de suelo a nivel de la subcuenca y hacer clasificaciones en rangos de erosión, así como la cuantificación del sedimento de cada uno de los rangos establecidos. Por lo tanto la tecnología de los sistemas información geográfico constituyen una herramienta de utilidad para el almacenamiento,

procesamiento, recuperación y análisis de información voluminosa a nivel espacial. Permitiendo la aplicación de diferentes modelos a nivel de cuenca.

En la transferencia de información de fotografías aéreas a mapas, se dieron errores de desplazamiento radial debido al relieve, especialmente en áreas montañosas. El error que se produce es debido a que las fotografías áreas normales están tomadas con un sistema de proyección cónico y el resultado que se quiere es un mapa georeferenciado con proyección ortogonal (la proyección de los rasgos topográficos coincide con su vertical del lugar). Por lo tanto en estudios en los que sea importante la georeferenciación, las fotografías áreas verticales con proyección cónica, deben ser restituidas, para obtener, ortofotografías (fotografías con proyección ortogonal); para evitar problemas de inclinación y desplazamiento radial, distorsiones debidas a la variación altitudinal, distorsiones debidas a la inclinación de la cámara al momento de la exposición.

Uno de los principales problemas de trabajar con los sistemas de información geográfico es de cometer errores de georeferenciación, especialmente si la información básica a digitalizar es grande (muchos mapas). Una opción para reducir éste error sería de utilizar un mapa base (plantilla base), del cual se derive toda la información básica.

VI. BIBLIOGRAFIA

- ADELSON R. 1989. 1988. Primera evaluación de tres prácticas de conservación de suelos en la cuenca del río Pensativo, Sacatepequez. Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de San Carlos, Facultad de Agronomía. 80 p.
- AMEZQUITA COLLAZOS, E.; FORSYTHE, W.M. 1975. Aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelo en Turrialba, Costa Rica. s.l., s.e. 30 p. (mimeografiado) presentado en: Congreso Latinoamericano de la ciencia del suelo (5, 1975, Medellín, Col.)
- ARNULDUS, H.M.J. 1977 Predicting soil losses due to sheet and rill erosion. Roma, FAO. p. 99-124. (FAO Conservation guide no. 1)
- BOLAÑOS, A.; FALLAS, J. 1991. Evaluación de erosión potencial de la cuenca del río Blanco, Guanacaste, Costa Rica utilizando idrisi y el sistema IUM. *in* Taller de erosión de suelos (1991, Heredia, C.R.). Memoria. Heredia, Universidad Nacional/FAO/PRODAF/IPGH. p. 85-101.
- BORK, H,R. 1991. The estimation of soil erosion and deposition processes using simulation models. *in* Taller de erosión de suelos (1991, Heredia, C.R.). Memoria. Heredia, Universidad Nacional/FAO/PRODAF/IPGH. p. 11-26.
- BRAVO DE LEON, M.E. 1988. Estudio preliminar de la erosividad de las lluvias en la República de Guatemala. Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de San Carlos, Facultad de Agronomía. 40 p.
- BRICEÑO, A.J.; PACHECO, R. 1984. Métodos analíticos para el estudio de suelos y plantas. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 137 p.
- CABRERA GAILLARD, C.R. 1986. Caracterización de los recursos naturales renovables de la subcuenca del río Pensativo. Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de San Carlos, Facultad de Agronomía. 212 p.
- CHAN SANTISTEBAN, M.L. 1992. Evaluación de tres prácticas de conservación de suelos en la cuenca del río Pensativo, Sacatepequez (Fase V). Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Dirección General de Investigación. 58 p. (sin publicar)
- CHOW, V.T. 1964. Handbook of applied hydrology : a compendium of water resources technology. New York, McGraw- Hill. p. irr.

- CID ASTURIAS, R. DEL. 1986. Determinación del índice de erosividad de las lluvias para las estaciones pluviográficas de la zona noroccidental de Guatemala. Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de San Carlos, Facultad de Agronomía. 47 p.
- DOUROJEANNI RICORDI, A. 1967. La ecuación universal de pérdida de suelo y su aplicación al planeamiento del uso de las tierras agrícolas, estudio del factor de las lluvias en el Perú. Tesis Ing. Agr. Lima, Perú, Universidad Agraria, Facultad de Ingeniería Agrícola. 78 p.
- FAO. 1979. A provisional methodology for soil degradation assessment. Roma, Italia. 84 p.
- FORSYTHE, W. 1985. Física de suelos: manual de laboratorio. San José, C.R., IICA. 212 p.
- FOSTER, G.R.; McCOOL, D.K.; RENARD, K.G.; MOLDENHAUER, W.C 1981. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. Journal of Soil and Water Conservation (EE.UU.) 36(6):355-359
- GANZALEZ DEL TANAGO, M. 1991. La ecuación universal de pérdida de suelo. Pasado, presente y futuro. Ecología (España) no. 5:13-50
- GARZON SANCHEZ, H. 1991. Evaluación de la Erosión hídrica y la escorrentía superficial bajo sistemas agroforestales, en tierras de ladera, Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., CATIE. 121 p.
- GREENLAND, D.J.; LAL, R. 1977. Soil conservation and management in the humid tropics. Chichester, G.B., J. Wiley. 283 p.
- GUTIERREZ DIAS, M.A. 1987. Determinación del índice de erosividad de las lluvias y su relación con la cobertura vegetal, suelos y pendientes, para la cuenca del río Grande de Térraba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., UCR/CATIE. 127 p.
- HARMAN, D.; FULLER TSUCHIGANE, R.; FULLER, K. 1980. Economic implications of a management-oriented remote sensing program. Coastal Zone Management Journal (EE.UU) 8:105-122.
- HERANDEZ LOPEZ, J.E. 1990. Segunda evaluación de tres prácticas de conservación de suelos en la cuenca del río Pensativo, Sacatepequez. Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de San Carlos, Facultad de Agronomía. 56 p.

- HERRERA, M.; TOBIAS, H.; GALVEZ, L.; TOJIN, S. 1991. Evaluación de prácticas de conservación de suelos en la cuenca del río Pensativo (Fase III). *Tikalía (gua.)* 9(1/2):35-49
- JENSEN, J. et al. 1989. Remote sensing and numerical modeling of suspended sediments in Laguna de Términos, Campeche, México. s.n.t. p. 33-44.
- KAPETSKY, J. M.; MCGREGOR, L.; NANN, H. E. 1987. A geographical information system and satellite remote sensing to plan for aquaculture development: A FAO/UNEP/GRID Cooperative Study in Costa Rica. FAO Fisheries Technical Paper no. 287. 51 p.
- KIRKBY, J.J. 1984. El problema. *in* Kirkby, M.J.; Morgan, R.P.C. (comps). Erosión de suelos. México, Limusa. p. 15-33.
- LEONARD, H.J. 1986. Recursos naturales y desarrollo económico en América Central: un perfil ambiental regional. Agosto, 1985. Trad. G. Budowski y T. Maldonado. San José, C.R., CATIE. 267 P.
- LOPEZ CARDENAS, D.F. 1968. Aspectos cualitativos y cuantitativos de la erosión hídrica, y del transporte y depósito de materiales. Madrid, Ministerio de Agricultura, Dirección General de Montes, Caza y Pesca Fluvial, Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias. 190 p.
- LOPEZ H., J.E.; HERRERA, M.; TOBIAS V., H. A. 1990. Evaluación de prácticas de conservación de suelos en la Cuenca del río Pensativo, Sacatepéquez. *Tikalía (Gua)* 8(1-2):75-95
- MCOOL, D.K.; FOSTER, G.R.; WEESSIES, G.A. 1989. Slope length and steepness factors (LS). *in* The revised universal soil loss equation. Tucson, Arizona, US. Department of Agriculture, Agricultural Research Service. Cap. 4 (sin publicar) Citado por: González del Tánago, M. 1991. La ecuación universal de pérdida de suelo. Pasado, presente y futuro. *Ecología (España)* no. 5:13-50
- MITCHELL, J.K.Ñ; BUBENZER, G.D. 1984. Estimación de la pérdida de suelo. *in* Kirkby, M.J.; Morgan, R.P.C. (comps). Erosión de suelos. México, Limusa. p. 15-
- MORA CORDERO, I. 1987. Evaluación de la pérdida de suelo mediante la ecuación universal (EUPS): Aplicaciones para definir acciones de manejo en la cuenca del río Pejibaye, Vertiente Atlántica, Costa Rica. Tesis Mag Sc. Turrialba, C.R., UCR/CATIE. 104 p.

- DEA. 1972. Programa para manejo y conservación de los recursos suelo, vegetación y agua de la región del altiplano en Guatemala. Guatemala. p. irr.
- DREAMUNO V., R.; SABORIO, J. B. 1990. Elaboración automatizada del mapa de erosión de la cuenca alta del río Virilla. Turrialba, C. R., CATIE. 15 p.
- PHENG, K.; KAM, W. 1989. Geographic Information Systems in resource assessment and planning. Tropical Coastal Area Management no. 4: 1-5.
- PINEDA COTZOJAY, P.A. 1991 Cuarta evaluación de tres prácticas de conservación de suelos en el cultivo de frijol (Phaseolus vulgaris L.) en la cuenca del río Pensativo, Sacatepequez, Guatemala. Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de San Carlos, Facultad de Agronomía. 61 p.
- REYES, W. N. 1982. Caracterización preliminar de la cuenca del río Achiguate. Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. 265 p.
- ROCHA, J.R. 1977. Erosión de suelos de pendientes cultivadas con maíz y frijol con diferentes grados de cobertura. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., UCR/CATIE. 182 p.
- ROELS, J.M; JONKER, P.J. 1983. Probability sampling techniques for estimating soil erosion. Soil science society of america journal (EE.UU.) 47:1224-1228.
- ROSADO, P., P.; BARRIENTOS, C., L.E.; LIMA, L./ S.A. 1992. La labor de control de la erosión del suelo en Guatemala. Breve análisis económico e institucional. Guatemala, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, DIGESA. p irr. (En borrador)
- ROSAL DEL CID, C. R. 1988. Evaluación de las tierras y de su uso en la subcuenca del río Pensativo en Guatemala y directrices generales para su manejo sostenido. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., CATIE. 380 p.
- SANCHEZ, M. A.; ALVARES, G. P. 1991. Aplicación de la EUPS a nivel de una microcuenca, el caso de la quebrada Pital, Puriscal. *in* Taller de erosión de suelos (1991, Heredia, C.R.). Memoria. Heredia, Universidad Nacional/FAO/PRODAF/IPGH. p. 144-163.

- SKIDMORE, E. L. 1982. Soil loss tolerance. *in* Determinants of Soil Tolerance Symposium (1979, Fort Collins, Col.) American Society of Agronomy. Special Publication no. 4: p. 87-93.
- TALLER DE EROSION DE SUELOS (1991, HEREDIA, C.R.). 1991 Memoria. Ed. por W.-G Vahrson; M. Alfaro; G. Palacios Heredia, C.R., UNA/FAO/PRODAF/IPGH. 236 p.
- US. SOIL CONSERVATION SERVICE. 1984. Investigación de suelos métodos de laboratorio y procedimientos para recoger muestras. Trad. por Agustín Cotín. México, Editoria Trillas. s.p.
- VAHRSON, W. G.; CERVANTES, C. 1991. Escorrentía superficial y erosión laminar en Puriscal, Costa Rica. *in* Taller de erosión de suelos (1991, Heredia, C.R.). Memoria. Heredia Universidad Nacional/FAO/PRODAF/IPGH. p. 116-130.
- VIESSMAN, W.; LEWIS, G.L.; KNAPP, J.W. 1989. Introducción to hydrology. 3ra ed. New York, Harper and Row. 780 p.
- WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D.; UHLAND, R.E. 1958. Evaluation of factors in the soil-loss equation. *Agricultural engineering* (EE.UU.) 39(8):458-462.
- . 1965. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: guide for selection of practices for soil and water conservation. U.S. Department of Agriculture. Agriculture Handbook No. 282. 47 p.
- . MANNERING, J.V. 1969. Relation of soil properties to its erodibility. *Soil Science Society of America Proceedings* (EE.UU.) 33:131-136.
- ; JOHNSON, C.B.; CROSS, B.V. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation* (EE.UU.) 26(5):189-193.
- . 1976. Use and misuse of the universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation* (EE.UU.) 31(1):5-9.
- ; SMITH, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses a guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture. Agriculture Handbook No. 537. 58 p.

A N E X O S

Cuadro 1A. Valores promedios de la información básica para determinar el factor K. en $\frac{t.ha.h}{ha.MJ.mn}$

Tipo de suelo	%Limo	%Arena muy fina	%Arena total.	%de arcilla	%Limo más Arena muy fina	%de M.O	Código estruct.	Código conduct. hidrául.	Tipo cobertura	Valor de K en $\frac{t.ha.h}{ha.MJ.mn}$
Typic Eutrandepts.	37.01	1.90	49.04	13.95	38.91	2.50	2	5	Bosque	0.0340
Typic Eutrandepts.	34.26	2.05	51.72	14.02	36.31	3.02	2	5	Bosque	0.0305
Typic Eutrandepts.	25.72	1.39	61.59	12.69	27.11	3.15	2	5	Bosque	0.0238
Typic Eutrandepts.	27.05	2.84	63.19	9.76	29.89	3.23	2	5	Bosque	0.0264
Typic Eutrandepts.	28.70	4.35	58.76	12.54	33.05	3.96	2	5	Bosque	0.0262
Typic Eutrandepts.	27.05	2.84	63.19	9.76	29.89	4.00	3	5	Cultivo	0.0289
Typic Eutrandepts.	28.70	4.35	58.76	12.54	33.05	4.00	3	5	Cultivo	0.0304
Typic Eutrandepts.	25.72	1.39	61.59	12.69	27.11	4.92	3	5	Cultivo	0.0264
Typic Eutrandepts.	37.01	1.90	49.04	13.95	38.91	5.05	3	5	Cultivo	0.0339
Typic Eutrandepts.	34.26	2.05	51.72	14.02	36.31	6.69	3	5	Cultivo	0.0322
Typic Ustropepts.	28.29	1.88	56.35	15.36	30.17	3.60	2	5	Cultivo	0.0244
Typic Ustropepts.	28.29	1.88	56.35	15.36	30.17	10.10	3	5	Bosque	0.0278
Typic Vitrandepts.	34.51	4.38	55.11	10.38	38.89	3.24	2	5	Cultivo	0.0330
Typic Vitrandepts.	29.77	3.06	58.20	12.03	32.83	3.50	2	5	Cultivo	0.0273
Typic Vitrandepts.	29.77	3.06	58.20	12.03	32.83	4.00	3	5	Bosque	0.0304
Typic Vitrandepts.	34.51	4.38	55.11	10.38	38.89	10.63	3	5	Bosque	0.0350
Molic Vitrandepts.	36.41	2.20	50.07	13.52	38.61	3.08	2	5	Cultivo	0.0322
Molic Vitrandepts.	36.41	2.20	50.07	13.52	38.61	4.00	3	5	Bosque	0.0339
F. Ustipsamments.	18.17	3.11	72.73	9.10	21.28	1.98	2	5	Cultivo	0.0220
F. Ustipsamments.	28.52	4.25	58.18	13.30	32.77	2.50	2	5	Cultivo	0.0293
F. Ustipsamments.	18.17	3.11	72.73	9.10	21.28	4.00	3	5	Bosque	0.0232
F. Ustipsamments.	28.52	4.25	58.18	13.30	32.77	4.46	3	5	Bosque	0.0300
Asociación.	33.72	3.08	49.02	17.26	36.80	2.12	2	5	Cultivo	0.0322
Asociación.	25.74	4.61	62.37	11.89	30.35	2.32	2	5	Cultivo	0.0282
Asociación.	37.53	4.56	52.07	10.40	42.09	2.41	2	5	Cultivo	0.0383
Asociación.	33.72	3.08	49.02	17.26	36.80	4.07	3	5	Bosque	0.0316
Asociación.	37.53	4.56	52.07	10.40	42.09	7.32	3	5	Bosque	0.0373
Asociación.	25.74	4.61	62.37	11.89	30.35	10.02	3	5	Bosque	0.0287

Cuadro 2A. Valores del coeficiente B para calcular el exponente m para obtener el factor LS.

pendiente (%)	Coeficiente B	Exponente m
0.20	0.0384	0.04
0.50	0.0925	0.08
1.00	0.1757	0.15
2.00	0.3229	0.24
3.00	0.4514	0.31
4.00	0.5659	0.36
5.00	0.6692	0.40
6.00	0.7635	0.43
7.00	0.8501	0.46
8.00	0.9303	0.48
9.00	1.0048	0.50
10.00	1.0745	0.52
11.00	1.1398	0.53
12.00	1.2012	0.55
13.00	1.2592	0.56
14.00	1.3141	0.57
15.00	1.3662	0.58
16.00	1.4157	0.59
17.00	1.4628	0.59
18.00	1.5078	0.60
19.00	1.5508	0.61
20.00	1.5919	0.61
21.00	1.6313	0.62
22.00	1.6691	0.62
23.00	1.7054	0.63
24.00	1.7403	0.63
25.00	1.7739	0.64
26.00	1.8053	0.64
27.00	1.8374	0.65
28.00	1.8676	0.65
29.00	1.8966	0.65
30.00	1.9247	0.66
31.00	1.9518	0.66
32.00	1.9781	0.66
33.00	2.0035	0.67
34.00	2.0281	0.67
35.00	2.0519	0.67
36.00	2.0750	0.67
37.00	2.0974	0.68
38.00	2.1192	0.68
40.00	2.1608	0.68
42.00	2.2000	0.69
44.00	2.2371	0.69
46.00	2.2721	0.69
48.00	2.3053	0.69

Continuación Cuadro 2A.

pendiente (%)	Coefficiente B	Exponente m
50.00	2.3368	0.70
52.00	2.3667	0.70
54.00	2.3950	0.70
56.00	2.4220	0.70
58.00	2.4476	0.71
60.00	2.4720	0.71

Fuente: Ecuación de McCool et al (1989)

Cuadro 3A. Base de datos proveniente de información de parcelas de escorrentía.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J *
1.	1	1	1	1	550.7	37.0	0.1523	28.70	3619
2.	1	2	1	1	550.7	37.0	0.1579	32.30	3402
3.	1	3	1	1	550.7	37.0	0.1842	35.80	3177
4.	1	4	1	1	550.7	37.0	0.2013	37.00	2547
5.	1	5	1	1	550.7	37.0	0.1438	32.00	2941
6.	1	1	2	1	550.7	37.0	0.1708	30.60	3887
7.	1	2	2	1	550.7	37.0	0.1996	30.80	3587
8.	1	3	2	1	550.7	37.0	0.1796	35.80	3390
9.	1	4	2	1	550.7	37.0	0.2719	44.00	2641
10.	1	5	2	1	550.7	37.0	0.1444	31.00	2640
11.	1	1	3	1	550.7	37.0	1.0295	125.20	3482
12.	1	2	3	1	550.7	37.0	1.2802	120.20	3785
13.	1	3	3	1	550.7	37.0	1.5602	142.70	3200
14.	1	4	3	1	550.7	37.0	1.6519	170.40	2496
15.	1	5	3	1	550.7	37.0	0.994	124.00	3111
16.	1	1	4	1	550.7	37.0	2.9595	163.70	3666
17.	1	2	4	1	550.7	37.0	3.2224	180.40	3557
18.	1	3	4	1	550.7	37.0	3.6462	180.90	2675
19.	1	4	4	1	550.7	37.0	4.4405	217.20	1660
20.	1	5	4	1	550.7	37.0	2.6548	156.30	2533
21.	2	1	1	2	885.2	31.5	0.1800	8.54	1514
22.	2	2	1	2	885.2	31.5	0.3600	8.76	2076
23.	2	3	1	2	885.2	31.5	0.2200	10.33	3000
24.	2	4	1	2	885.2	31.5	0.3500	7.79	1743
25.	2	5	1	2	885.2	31.5	0.2000	8.89	1733
26.	2	1	2	2	885.2	31.5	0.2800	12.81	1781
27.	2	2	2	2	885.2	31.5	0.4800	12.71	1943
28.	2	3	2	2	885.2	31.5	0.2000	13.36	2514
29.	2	4	2	2	885.2	31.5	0.4100	14.07	1514
30.	2	5	2	2	885.2	31.5	0.2300	9.37	1714
31.	2	1	3	2	885.2	31.5	0.1000	11.84	2076
32.	2	2	3	2	885.2	31.5	0.3000	12.87	2190
33.	2	3	3	2	885.2	31.5	0.2000	15.65	2124
34.	2	4	3	2	885.2	31.5	0.3400	14.85	1429
35.	2	5	3	2	885.2	31.5	0.1400	11.67	1619
36.	2	1	4	2	885.2	31.5	0.4100	15.65	2324
37.	2	2	4	2	885.2	31.5	0.7100	16.36	2486
38.	2	3	4	2	885.2	31.5	0.8000	19.17	1733
39.	2	4	4	2	885.2	31.5	0.5800	20.52	1352
40.	2	5	4	2	885.2	31.5	0.5900	17.30	1324
41.	3	1	1	2	445.4	31.2	0.2500	5.24	1311
42.	3	2	1	2	445.4	31.2	0.3000	6.90	2126
43.	3	3	1	2	445.4	31.2	0.1800	7.48	1372
44.	3	4	1	2	445.4	31.2	0.2200	4.22	1040

Fuente: Revolorio (1989), Lopez H. (1990), Pineda C. (1991), CHANG S. (1992)

Continuación Cuadro 3A.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
45.	3	5	1	2	445.4	31.2	0.2400	6.13	1853
46.	3	1	2	2	445.4	31.2	0.3000	4.14	1394
47.	3	2	2	2	445.4	31.2	0.2800	5.72	2171
48.	3	3	2	2	445.4	31.2	0.3200	6.40	1342
49.	3	4	2	2	445.4	31.2	0.2500	7.10	1664
50.	3	5	2	2	445.4	31.2	0.2700	5.05	1457
51.	3	1	3	2	445.4	31.2	0.4100	10.16	1151
52.	3	2	3	2	445.4	31.2	0.2800	8.45	1527
53.	3	3	3	2	445.4	31.2	0.3500	7.99	1357
54.	3	4	3	2	445.4	31.2	0.3200	9.34	1358
55.	3	5	3	2	445.4	31.2	0.2000	7.47	1786
56.	3	1	4	2	445.4	31.2	1.1000	13.81	1061
57.	3	2	4	2	445.4	31.2	0.8400	14.71	1392
58.	3	3	4	2	445.4	31.2	0.9600	18.26	841
59.	3	4	4	2	445.4	31.2	0.7900	16.54	1064
60.	3	5	4	2	445.4	31.2	1.0500	14.45	1175
61.	4	1	1	1	472.4	14.8	0.1000	9.17	6287
62.	4	2	1	1	472.4	14.8	0.0900	10.03	5793
63.	4	3	1	1	472.4	14.8	0.1300	9.94	4715
64.	4	4	1	1	472.4	14.8	0.1600	11.20	5267
65.	4	5	1	1	472.4	14.8	0.0600	15.28	4824
66.	4	1	2	1	472.4	14.8	0.2100	16.41	7067
67.	4	2	2	1	472.4	14.8	0.0900	12.81	4249
68.	4	3	2	1	472.4	14.8	0.1700	18.32	4816
69.	4	4	2	1	472.4	14.8	0.1900	11.27	4550
70.	4	5	2	1	472.4	14.8	0.0900	16.21	5073
71.	4	1	3	1	472.4	14.8	0.2400	65.69	8666
72.	4	2	3	1	472.4	14.8	0.3700	82.93	4044
73.	4	3	3	1	472.4	14.8	0.3400	88.79	5373
74.	4	4	3	1	472.4	14.8	0.3700	82.87	4398
75.	4	5	3	1	472.4	14.8	0.3900	98.90	5034
76.	4	1	4	1	472.4	14.8	1.0900	82.40	6437
77.	4	2	4	1	472.4	14.8	1.4000	92.18	4154
78.	4	3	4	1	472.4	14.8	1.1500	92.29	3845
79.	4	4	4	1	472.4	14.8	1.0400	93.29	4340
80.	4	5	4	1	472.4	14.8	1.1300	110.35	5035

Fuente: Revolorio (1989), Lopez H. (1990), Pineda C. (1991), Chang S. (1992)

Donde * es:

A Número de registro

B Año de registro de la información:

- 1 1987
- 2 1988
- 3 1990
- 4 1991

C Repetición

D Práctica de conservación:

- 1 Acequia con barrera viva
- 2 Acequia con camellones en contorno
- 3 Barrera viva
- 4 Práctica tradicional

E Cultivo:

- 1 Maiz
- 2 Frijol

F Precipitación en mm (período de medición junio a diciembre)

G Intensidad máxima en mm/hr

H Sedimento en ton/ha

I Escorrentia en ton/ha

J Rendimiento en kg/ha

Cuadro 44. Valores de precipitación media en un año y para periodos de retorno de 5 y 10 años por estación.

Nombre de la Estación	pp	pp	pp	Desvia- cion es- tandar	Numero de años	C O O R D E N A D A S	
	media en un año	para T=5 años	para T=10 años			Latitud	Longitud
1. El Potrero	927.11	1078.64	1201.68	210.62	77	14°31'43"	90°45'58"
2. Florencia	1166.29	1362.84	1522.69	273.19	43	14°33'31"	90°40'58"
3. San Joaquín	1167.78	1376.68	1546.56	290.35	8	14°33'10"	90°40'09"
4. Antigua	771.63	1140.64	1278.09	234.91	56	14°33'20"	90°43'54"
5. Retana	903.16	1061.56	1190.39	220.17	16	14°32'54"	90°45'17"
6. Pastores	732.85	834.24	916.69	140.92	4	14°35'40"	90°45'50"
7. Guatemala-sur	891.97	1026.73	1136.33	187.31	9	14°32'25"	90°35'08"
8. Santa María de Jesús	1258.57	1444.83	1646.31	258.89	9	14°29'34"	90°42'34"
9. Carmona.	1223.08	1437.12	1611.19	297.50	24	14°30'55"	90°42'53"
10. La Suiza contenta.	1067.04	1252.70	1403.70	258.06	15	14°37'01"	90°39'30"

Cuadro 54. Valores de erosividad de la lluvia media en MJ.mm/ha.hora.año medias y para precipitaciones con periodos de retorno de 5 y 10 años por estación.

Nombre de la Estación	Factor R medio	Factor R para T=5 años	Factor R para T=10 años	C O O R D E N A D A S	
				Latitud	Longitud
1. El Potrero	3424.84	4629.53	5609.25	14°31'43"	90°45'58"
2. Florencia	5326.33	6888.89	8159.67	14°33'31"	90°40'58"
3. San Joaquín	5338.17	6998.87	8349.48	14°33'10"	90°40'09"
4. Antigua	3778.78	5122.40	6215.11	14°33'20"	90°43'54"
5. Retana	3234.44	4493.75	5517.96	14°32'54"	90°45'17"
6. Pastores	1880.42	2686.50	3342.00	14°35'40"	90°45'50"
7. Guatemala-sur	3145.48	4216.84	5088.13	14°32'25"	90°35'08"
8. Santa María de Jesús	6059.95	7540.73	8744.98	14°29'34"	90°42'34"
9. Carmona.	5777.81	7479.42	8863.27	14°30'55"	90°42'53"
10. La Suiza contenta.	4537.29	6013.32	7213.71	14°37'01"	90°39'30"

Cuadro 6A. Valores del factor L_2 según porcentaje y longitud de la pendiente.

Pendiente	Longitud en pies.																
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0
2.00	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
3.00	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
4.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
5.00	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
6.00	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06
7.00	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09
8.00	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
9.00	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
10.00	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18
11.00	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21
12.00	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24
13.00	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27
14.00	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
15.00	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33
16.00	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36
17.00	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39
18.00	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42
19.00	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45
20.00	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48
21.00	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51
22.00	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54
23.00	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57
24.00	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60
25.00	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63
26.00	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
27.00	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69
28.00	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72	1.72
29.00	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75
30.00	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78
31.00	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81
32.00	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84	1.84
33.00	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87
34.00	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90
35.00	1.93	1.93	1.93	1.93	1.93	1.93	1.93	1.93	1.93	1.93	1.93	1.93	1.93	1.93	1.93	1.93	1.93
36.00	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
37.00	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99
38.00	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02
39.00	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05
40.00	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08

Fuente: Ecuación de McCool et al. (1989)

Continuación del Cuadro No.

% de Pendientes	Longitud en pies.																
	3.00	4.00	5.0	12.0	15.0	20.0	30.0	35.0	100.0	150.0	200.0	250.0	300.0	400.0	600.0	1000.0	
42.00	0.38	1.09	1.42	1.75	2.04	2.37	4.65	6.14	5.25	9.98	12.03	14.02	15.88	19.34	25.54	31.19	36.24
44.00	0.40	1.12	1.52	1.81	2.11	2.41	4.85	6.41	5.46	10.33	12.59	14.69	16.65	20.30	26.84	32.72	38.16
46.00	0.42	1.15	1.57	1.88	2.19	2.48	5.04	6.67	5.67	10.77	13.15	15.34	17.41	21.24	28.12	34.32	40.05
48.00	0.44	1.20	1.64	1.94	2.26	2.55	5.22	6.92	5.86	11.21	13.69	15.99	18.15	22.16	29.38	35.88	41.90
50.00	0.46	1.23	1.70	2.00	2.33	2.63	5.41	7.17	6.08	11.64	14.22	16.62	18.87	23.07	30.61	37.42	43.72
52.00	0.48	1.27	1.75	2.06	2.40	2.74	5.58	7.42	6.27	12.05	14.74	17.24	19.58	23.95	31.82	38.92	45.51
54.00	0.50	1.30	1.80	2.11	2.47	2.84	5.76	7.66	6.46	12.46	15.25	17.84	20.28	24.82	33.00	40.40	47.25
56.00	0.52	1.33	1.85	2.17	2.54	2.94	5.93	7.89	6.65	12.86	15.75	18.43	20.96	25.67	34.16	41.84	48.97
58.00	0.53	1.36	1.90	2.22	2.60	3.05	6.09	8.11	6.83	13.24	16.23	19.00	21.62	26.49	35.29	43.25	50.64
60.00	0.55	1.38	1.95	2.27	2.66	3.16	6.25	8.33	7.01	13.62	16.70	19.57	22.27	27.30	36.59	44.63	52.28

Fuente: Ecuación de MacCall et al. (1988)