

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA

PROGRAMA DE ENSEÑANZA

AREA DE POSGRADO

DETERMINACION DE AREAS CRITICAS MEDIANTE SISTEMAS DE
INFORMACION GEOGRAFICA, CUENCA DEL RIO REVENTADO, COSTA RICA

Tesis sometida a la consideración del Comité Técnico de
Posgrado y Capacitación del Programa de Enseñanza en Ciencias
Agrícolas y Recursos Naturales del Centro Agronómico Tropical
de Investigación y Enseñanza, para optar al grado de

Magister Scientiae

Por

OCTAVIO ADALID SANCHEZ ESCOTO

Turrialba, Costa Rica

1993

DEDICATORIA

A mi adorada hija Paola

A mi querida esposa Gilma Elizabeth Bustillo

A mis padres Mariano Sánchez y Elizabeth Escoto

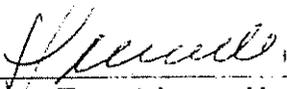
A mis hermanos y demás familiares

A todos mis amigos y compañeros de la promoción CATIE 91-93

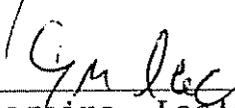
Esta tesis ha sido aceptada, en su presente forma, por la Coordinación del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales Renovables del CATIE y aprobada por el Comité Asesor del estudiante como requisito parcial para optar al grado de:

MAGISTER SCIENTIAE

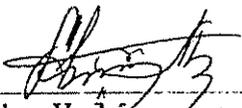
FIRMANTES:



Jorge Faustino, M. Sc.
Profesor Consejero



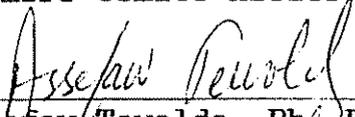
Gregoire Leclerc, Ph. D.
Miembro Comité Asesor



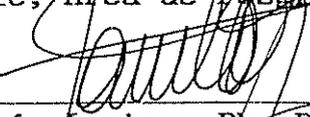
Sergio Velásquez, M. Sc.
Miembro Comité Asesor



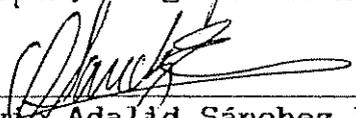
Jean Collinet, Ph. D.
Miembro Comité Asesor



Assefaw Tewolde, Ph. D.
Jefe, Area de Posgrado



Ramón Lastra, Ph. D.
Director, Programa de Enseñanza



Octavio Adalid Sánchez Escoto
Candidato

AGRADECIMIENTO

El autor desea expresar su agradecimiento a las siguientes personas e instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo:

A don Jorge Faustino, director de tesis por su orientación y oportunas sugerencias en la realización de este proyecto.

A los miembros del comite asesor del proyecto de tesis: Dr. Gregoire Leclerc, Dr. Jean Collinet y M Sc. Sergio Velázquez.

Al Centro Agronómico tropical de Investigación y Enseñanza

A la Escuela Nacional de Agricultura, Honduras.

A la DAAD por el apoyo económico que hizo posible la culminación de este trabajo.

BIOGRAFIA

El autor nació el 14 de octubre de 1957 en el municipio de Esquias, departamento de comayagua, república de Honduras.

Realizó sus estudios secundarios en el instituto patria de La Lima, Cortes, obteniendo el título de Bachiller en Ciencias y Letras en el año de 1977.

En 1978 ingresó a la Facultad de Agronomía del Centro Universitario Regional del Litoral Atlántico de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras, obteniendo el título de Ingeniero Agrónomo.

Durante el período de 1980 a 1982 se desempeñó en el cargo de asistente de investigación en Fisiología Vegetal y Fitomejoramiento en la Facultad de Agronomía.

Desde enero de 1983 hasta diciembre de 1984 presta sus servicios en la Escuela de Agricultura John F. Kennedy, como Catedrático de Agronomía en el área de edafología y producción de granos básicos; trasladándose en 1985 a la Escuela Nacional de Agricultura donde se desempeña como catedrático de agronomía, encargado del laboratorio de suelos y técnico del departamento de agronomía.

En 1987 realizó estudios de Edafología y Biología Vegetal en la Universidad de Sevilla y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas en la república de España.

En septiembre de 1991, ingresó al programa de maestría del Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza (C.A.T.I.E) obteniendo el título de Magister Scientiae en Manejo Integrado de Recursos Naturales, en la especialidad de Cuencas Hidrográficas.

CONTENIDO

	Página
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
BIOGRAFIA	v
CONTENIDO	vi
LISTA DE CUADROS	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE ANEXOS	xi
RESUMEN	xii
SUMMARY	xiv
I INTRODUCCION	1
1.1 Objetivos Generales	4
1.2 Objetivos Específicos	4
II REVISION BIBLIOGRAFICA	5
2.1 Situación de las Cuencas en Centroamérica	5
2.2 Erosión de los Suelos	5
2.3 Determinación de Cuencas Prioritarias	7
2.4 Los Sistemas de Información Geográfica	8
2.4.1 Definición de los SIG	8
2.4.2 Representación de los Datos en un SIG	10
2.4.3 Componentes de un SIG	10
2.4.4 Los SIG y las Imágenes de Sensores Remotos	11
2.4.5 Aplicaciones de los SIG en la Evaluación de los Recursos Naturales	12
a) Manejo Forestal	13
b) Erosión de los Suelos	14
c) Modelación Hidrológica	17
2.6 Descripción del Area de Estudio	18
2.6.1 Localización de la Cuenca del Reventado	18
2.6.2 Geología de la Cuenca del Río Reventado	20
2.6.3 Suelos y Uso de la Tierra	21
2.6.4 Hidrología de la Cuenca del Reventado	22
2.6.5 Aspectos Socioeconómicos Generales	23

III	MATERIALES Y METODOS	26
3.1	Materiales	26
3.1.1	Mapas e Información de Sensores Remotos	26
3.1.2	Equipo Cartográfico	26
3.1.3	Equipo para Trabajo de Campo	26
3.1.4	Equipo de Computación	27
3.1.5	Información General	27
3.1.6	Análisis de Laboratorio	27
3.2	Metodología	28
3.2.1	Actividades	28
a)	Reconocimiento de Campo	28
b)	Recopilación de la Información	28
c)	Análisis y procesamiento de la Información	28
3.3.	Métodos de Análisis	29
3.3.1	Modelo de Elevación Digital	29
3.3.2	Determinación del Uso de la Tierra	29
3.3.3	Determinación de la Capacidad de Uso de la Tierra	32
a)	Consideraciones Básicas	32
b)	Supuestos Adicionales	33
c)	Otros Factores Limitantes	33
3.3.4	Modelación de la Erosión Potencial de la Cuenca	36
a)	Aplicación de la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelos (EUPS)	36
b)	Breve Descripción del Modelo	36
c)	Factor de Erosividad de las Lluvias (R)	37
d)	Factor de Erodabilidad del Suelo (K)	37
e)	Factor Topográfico (LS)	38
f)	Factor de Cobertura (C)	40
g)	Factor de prácticas de Conservación (P)	42
3.3.5	Aplicación de la Metodología	42

3.3.6	Determinación de Areas con Riesgo de Derrumbe	46
a)	Información Necesaria para Aplicar la Metodología	47
b)	Procesamiento de la Información	48
IV	RESULTADOS Y DISCUSION	49
4.1	El Modelo de Elevación Digital (MED) de la Cuenca del Reventado	49
4.2	Uso Actual de la Tierra en la Cuenca del Reventado	50
4.3	Mapa del Uso Potencial de la tierra	54
4.4	Uso Conflictivo de la Tierra de la Cuenca del Reventado	61
4.5	Los Factores de la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelos	65
4.5.1	Cálculo del Factor de Erosividad de la Lluvia (R)	65
4.5.2	Factor de Erodabilidad de los Suelos(K)	67
4.5.3	Factor Longitud de la Pendiente	68
4.5.5	Factor de Pendiente (S)	70
4.5.6	Factor de Cobertura y Prácticas de Conservación de Suelos (CP)	71
4.5.7	Distribución Espacial de la Erosión en la Cuenca del Reventado	72
4.6	Determinación del Índice Absoluto y el Índice Relativo	76
4.7	Determinación de las Areas Críticas o Prioritarias	80
4.8	Determinación del Riesgo de Derrumbe en la Cuenca del Reventado	89
V	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	103
VI	BIBLIOGRAFIA	106
VII	ANEXOS	113

LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Población Total y por Sexo, Densidad Poblacional (Enero 1992)	24
2	Clasificación de las Pendientes (Sheng, 1990).	34
3	Clasificación de la Profundidad (Sheng, 1990).	34
4	Clasificación del Uso de la Tierra (Sheng, 1990). Regiones húmedas tropicales y subtropicales	35
5	Parámetros seleccionados por el CIDIAT para la determinación de áreas críticas	44
6	Parámetros seleccionados por el CIDIAT para la determinación de áreas críticas y las fuentes de información para aplicar la metodología	45
7	Uso de la Tierra en la cuenca del río Reventado. Area y porcentaje por Clase de uso (1993).	52
8	Categorías de pendientes predominantes en la cuenca (Sheng, 1990), área y porcentaje (1993).	55
9	Clasificación de las tierras por su capacidad de uso (Sheng 1990). Cuenca del Reventado 1993.	59
10	Uso Conflictivo en la cuenca del Reventado. Categoría, área y porcentaje (1993).	64
11	Estaciones Meteorológicas de la cuenca del Reventado. Índice de erosividad (Vahrson 1990).	66
12	Características de los perfiles de los suelos utilizados para el cálculo del Factor K	67
13	Valores del Factor K para los diferentes perfiles de la cuenca del Reventado	68
14	Valores del Factor S calculado para cada rango de pendiente	70
15	Valores del Factor C correspondiente a los diferentes usos de la tierra en la cuenca	72
16	Pérdida de suelos cuenca del río Reventado. Valores calculados mediante la EUPS (1993).	72

17	Matriz de los parámetros seleccionados por el CIDIAT para la determinación de Areas Críticas. Valores del Índice Absoluto	77
18	Valores del índice absoluto obtenidos de la matriz para priorizar asignados a los 34 parámetros del CIDIAT por 4 especialistas evaluadores, valor promedio obtenido.	78
19	Ordenamiento de los parámetros según su peso y cálculo del Índice Absoluto.	79
20	Programa para calcular el peso relativo de cada uno de los parámetros (Peso.bat)	82
21	Programa para calcular el mapa de Areas Críticas (Calcrici.bat)	83
22	Area y porcentaje para cada Nivel Crítico en la cuenca del río Reventado	84
23	Comparación de los Niveles Críticos entre la zona alta, media y baja de la cuenca	88
24	Composición volumétrica del perfil de la finca Retes	91
25	Composición volumétrica del perfil Prusia	92
26	Composición volumétrica del perfil Sanatorio Duran	92
27	Composición volumétrica del perfil Ortiga	92
28	Composición volumétrica del perfil La Rancherita	93
29	Cálculo de la columna de agua contenida entre porosidad total y $2/3$ CC para una profundidad de 150cm	93
30	Fuerza ejercida por la columna de agua en los diferentes perfiles	95
31	Categorías de Riesgo de Derrumbe, rango, área y porcentaje de cobertura en la cuenca	98

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Localización de la Cuenca del Río Reventado	19
2	Erodabilidad del suelo factor (K).	39
3	USO DE LA TIERRA 1993	51
4	USO DE LA TIERRA 1993 (AGRUPADO)	53
5	CLASES DE PENDIENTES	56
6	Flujograma del modelo para determinar la capacidad de uso de las tierras (Sheng, 1990).	58
7	USO POTENCIAL DE LA TIERRA	60
8	USO CONFLICTIVO	63
9	EROSION DE LOS SUELOS	73
10	Modelo cartográfico para la aplicación de la EUPS.	75
11	AREAS CRITICAS	85
12	ZONAS A PRIORIZAR	87
13	Ubicación de los perfiles en la cuenca del Reventado	96
14	ZONAS GEOMORFOLOGICAS	97
15	RIESGO DE DERRUMBE	99
16	Riesgo de derrumbe según pendiente Cuenca Río Reventado	100

LISTA DE ANEXOS

Anexo		Página
1	Archivo de valores para asignar los pesos a los parámetros del CIDIAT	114

RESUMEN

SANCHEZ ESCOTO, O. A. 1993. Tesis Mag. Sc. CATIE.

Determinación de áreas críticas mediante sistemas de información geográfica, cuenca del río Reventado, Costa Rica.

Palabras claves: Areas Críticas, Sistemas de Información Geográfica, SIG, Modelo, Uso Potencial, Ecuación Universal de Pérdida de Suelos, EUPS, Derrumbes.

Se utilizó un sistema de información geográfico (IDRISI), en la aplicación de una metodología para la determinación de áreas críticas o prioritarias a nivel de microcuenca, esta metodología fue propuesta por el Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras (CIDIAT) del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables de Venezuela.

El estudio fue realizado en la cuenca del río Reventado, ubicado en la provincia de Cartago, Costa Rica; con un área de 2152.26 ha, suelos de origen volcánico, sus vertientes se caracterizan por la presencia de fuertes pendientes, laderas inestables, su cauce principal tiene una longitud de 12 km y es un típico río de montaña, con un cauce de uno a dos metros de ancho y 15 cm de profundidad en la época no lluviosa.

Para el análisis de algunos de los parámetros utilizados por la metodología del CIDIAT, fue necesario la utilización de algunos modelos. Así, para la determinación del uso potencial de las tierras, se usó el modelo propuesto por Sheng (1990) y la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelos, para estimar la erosión laminar en la cuenca. Además, se utilizó un modelo (Collinet 1992) para la determinación de las áreas que presentan un peligro potencial de derrumbe.

La utilización de un sistema de información geográfica, para el análisis espacial de los parámetros propuestos por la metodología del CIDIAT, permitió calcular la suma de los pesos de los parámetros y el valor correspondiente para cada pixel, realizando posteriormente un agrupamiento de las áreas con valores similares, en cinco categorías o niveles críticos.

El agrupamiento de los valores, se representó en un mapa que indica la ubicación de aquellas áreas que tienen un nivel crítico mayor, estas deben ser caracterizadas para definir un plan de rehabilitación; según los resultados de este trabajo, en esta cuenca las áreas más críticas o prioritarias, se localizan en su mayoría en la parte media.

La aplicación del modelo para determinar las áreas con riesgo de derrumbe fue realizado también mediante un SIG, el análisis espacial de los parámetros considerados permitió identificar aquellas áreas que presentan un mayor peligro de derrumbe y están representadas en su respectivo mapa de riesgos.

SUMMARY

SANCHEZ ESCOTO, O. A. 1993. Tesis Mag. Sc. CATIE.

Determinación de áreas críticas mediante sistemas de información geográfica, cuenca del río Reventado, Costa Rica.

Key words: Critical areas, Geographical Information Systems, GIS, Model, Potential Use, Universal Soil Loss Equation, USLE, Landslides.

The geographical information system (IDRISI) was used to apply a methodology to determine critical or priority areas at a micro-basin level. This methodology was proposed by the Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras (CIDIAT) of the Venezuelan Ministry of the Environment and Renewable Natural Resources.

The study was conducted in the Reventado River basin located in Cartago, Costa Rica. This basin has an area of 2152.26 ha, volcanic soils, sharply sloping banks, and unstable slopes. The principal riverbed is 12 km long, and is a typical mountain river, one to two meters wide and 15 cm deep during the dry season.

It was necessary to use models to analyze some of the parameters proposed by the CIDIAT methodology. The model proposed by Sheng (1990) was used to determine potential land use and the Universal Soil Loss Equation was used to estimate laminar erosion in the basin. A model (Collinet 1992) was utilized to determine areas which show landslide potential.

The use of a geographical information system to conduct a spatial analysis of parameters proposed by the CIDIAT methodology permitted the calculation of the sum of the weights of the parameters and the corresponding value for each "pixel" allowing a later grouping of areas with similar values in five categories or critical levels.

The grouping of values was represented in a map which allowed the placement of those areas which have a higher critical level. These should be characterized to define a rehabilitation plan; in this basin the areas with higher critical levels are found, for the most part, in the middle region.

The application of the model to determine areas with landslide risk was also conducted using a GIS. The spatial analysis of the parameters permitted the identification of those areas which present greater landslide danger and are represented in their respective risk map.

I INTRODUCCION

El deterioro y degradación actual de la mayoría de las cuencas hidrográficas en Centroamérica, es considerada como crítica, en todos los países del área, con excepción de Belice (Leonard, 1986). Por esta razón la evaluación permanente de los recursos naturales es uno de los aspectos importantes a considerar en la elaboración de los planes de desarrollo para una región o un país, esto permitirá definir estrategias de uso y aprovechamiento, elaboración de planes de manejo lo mismo que concentrar esfuerzos y recursos en áreas consideradas como prioritarias por su importancia estratégica, ya sea para producción de agua potable, energía o producción agrícola.

Debido a la escasez de recursos humanos y financieros que prevalece en éstos países es urgente el desarrollo de metodologías que permitan la evaluación de los recursos y la identificación de aquellas áreas que se consideran como degradadas o críticas, en forma precisa, rápida y económica.

El desarrollo de la informática en los últimos años y los adelantos en el procesamiento de las imágenes de sensores remotos, ha permitido su uso cada vez más generalizado en la evaluación de los recursos naturales; el costo de ésta tecnología cada vez es más bajo y la capacidad de almacenamiento y análisis de la información cada vez mayor, por lo que constituye una alternativa metodológica promisoría, especialmente para estudios a nivel de reconocimiento de grandes áreas o aquellas zonas que tienen dificultades de acceso.

La utilización de las imágenes de sensores remotos y los sistemas de información geográfica en la evaluación de los recursos naturales esta ampliamente documentada (Saborío, 1992; Dengo, 1988; Segovia, 1988; Coppock, 1992), esta tecnología

permite la captura, el análisis y despliegue de datos espaciales, lo mismo que el almacenamiento y manipulación de grandes volúmenes de información, además facilita la actualización de la información y el monitoreo casi permanente de la cobertura de la tierra.

El objetivo de éste trabajo fue la aplicación de una metodología para la identificación de microcuencas prioritarias o críticas propuesta por el Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras (CIDIAT) del Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales de Venezuela, la cual se realizó mediante la utilización de un sistema de información geográfica (SIG) y las imágenes de sensores remotos (aerofotografías).

El análisis de la información en las metodologías tradicionales para determinar cuencas prioritarias o determinación de áreas críticas se hace utilizando tablas o matrices en las cuales se anota el valor correspondiente a cada parámetro considerado, según su importancia relativa y absoluta en la cuenca, permitiendo así establecer una jerarquía en función del valor total obtenido para cada cuenca o microcuenca.

Mediante la utilización de un SIG el análisis de los parámetros considerados se realiza en forma espacial y el despliegue de la información se realiza en forma cartográfica o de mapas que señalan o identifican la ubicación de las áreas consideradas como críticas, las cuales deben ser caracterizadas para establecer proyectos y actividades orientadas a la rehabilitación y la promoción de prácticas de manejo de los recursos que promuevan una producción sostenida.

Para analizar algunos parámetros propuestos por la metodología del CIDIAT, se emplearon diferentes modelos: para la determinación de la capacidad de uso de la tierra, se utilizó el

modelo desarrollado por Sheng (1990) para los trópicos húmedos y para la estimación de la cantidad de suelo perdido por erosión laminar, se utilizó la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelos (USLE por sus siglas en inglés), modelo desarrollado por Wischmeier *et al*, a partir de 1957 (Kirkby y Morgan, 1984).

Otro de los aspectos estudiados en este trabajo fue la determinación de áreas con riesgo potencial de derrumbe, para lo cual se utilizó un modelo que considera el relieve y las características hidrodinámicas de los suelos (Collinet, 1992). El análisis de los parámetros considerados fue realizado en forma espacial, mediante un sistema de información geográfica (SIG).

La hipótesis considerada en el estudio fue determinar la posibilidad y ventajas de utilizar de un sistema de información geográfica en la aplicación de la metodología propuesta por el CIDIAT.

El trabajo tuvo una duración de un año y se realizó en la cuenca del río Reventado, ubicado en la provincia de Cartago, Costa Rica; esta cuenca, por sus características climáticas, topográficas, geomorfológicas y uso de los suelos, presenta laderas inestables y un riesgo potencial de derrumbes que pueden generar avenidas repentinas, las cuales son un peligro permanente de inundación para la ciudad de Cartago y un aporte de sedimentos a la represa hidroeléctrica de Cachí.

La determinación de las áreas críticas en esta cuenca y su caracterización posterior, permitirá la elaboración de un plan de manejo y la propuesta de actividades a lo largo de la cuenca, conducentes a la rehabilitación, la preservación de las zonas productoras de agua, la conservación de la biodiversidad y un uso adecuado del suelos con prácticas de manejo que promuevan una producción sostenida de los recursos naturales.

1.1 Objetivos Generales

- Utilizar en una cuenca hidrográfica, un sistema de información geográfica en la aplicación de una metodología para la determinación de áreas críticas o prioritarias.
- Determinar mediante la utilización de un sistema de información geográfica, aquellas áreas que por sus características hidrodinámicas, geológicas y de relieve presentan un riesgo potencial de derrumbe.

1.2 Objetivos Específicos

- Utilizar la metodología del CIDIAT para determinar prioridades ó áreas críticas en una cuenca, mediante un sistema de información geográfica (IDRISI).
- Determinar las pérdidas de suelo en la cuenca del río Reventado mediante la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (EUPS) y un SIG.
- Determinar el uso potencial de los suelos mediante la metodología de Sheng (1990) y un SIG.
- Evaluar el uso actual de la tierra en la cuenca del río Reventado, mediante el análisis de información de sensores remotos (fotografías aéreas) y comprobación de campo.

II REVISION BIBLIOGRAFICA

En la mayoría de las cuencas hidrográficas de los países de América Tropical, es evidente la falta de un adecuado manejo de los recursos naturales; esto implica, una deficiente planificación y manejo del uso de la tierra, lo cual, asociado a las características biofísicas adversas, genera una serie de impactos negativos, tanto en las obras y actividades como en el ambiente natural de dichas áreas (Faustino, 1987).

2.1 Situación de las Cuencas en Centroamérica

El estado actual de deterioro y degradación de las cuencas hidrográficas en Centroamérica, como consecuencia de prácticas inapropiadas del uso de la tierra, tala de los bosques, expansión de la actividad ganadera, agricultura de ladera, agricultura migratoria, sumado a los problemas socioeconómicos prevaletentes; es considerado como crítico para la mayoría de las cuencas de todos los países con la excepción de Belice (Leonard, 1986).

2.2 Erosión de los Suelos

Si se hace un análisis de cada uno de los países de Centroamérica, el problema más crítico de erosión se presenta en El Salvador, donde a mediados de la década de 1980, se estimaba que más del 50% del país estaba enfrentando problemas graves de erosión o estaba seriamente degradado.

La situación en los demás países, en las cuencas que drenan en la vertiente del pacífico, es similar a El Salvador. La razón de que la erosión del suelo sea un problema más serio en las áreas del pacífico que en la vertiente del Caribe, no está relacionado con diferencias en las prácticas de manejo de las

tierras. Las altas tasas de pérdida de suelos en el Pacífico centroamericano, se debe a la presencia de suelos volcánicos altamente erosivos, mayor intensidad de las lluvias, fuertes pendientes, quemadas estacionales, suelos desnudos al inicio del período lluvioso y a la mayor concentración de población.

La erosión en las tierras altas de Guatemala es tan grave como en El Salvador, se calcula que alrededor del 65% de la superficie de Guatemala es altamente susceptible a la erosión, y del 25 al 35% esta seriamente erosionada o degradada; en algunas regiones se han estimado pérdidas de 267 tha^{-1} año como se reporta en la cuenca Xaya-Pixcaya (Leonard, 1986) y de 231 tha^{-1} año en el municipio de Jalapa (Rosado et al, 1992), citados por Arana (1992).

En Honduras, el 75% del territorio esta formado por tierras montañosas no volcánicas sujetas a una estación seca y quemadas frecuentes; gran parte del interior y sur del país están sujetos a una fuerte degradación de los suelo y se estima que anualmente se degradan alrededor de 80,000 ha (Mendieta,1989); las tasas anuales de erosión en las partes quebradas y deforestadas alcanzan mas de 500 tha^{-1} año (Campanella, 1982) citado por Mendieta (1989).

En Costa Rica, los niveles de erosión del suelo de la vertiente del pacífico son muy altos, un estudio hecho a principios de la década de 1980, estimó que casi el 25% de las cuencas que drenan al pacífico estaban seriamente erosionadas (Harthshorn, 1982).

En Nicaragua, la erosión de los suelos ha sido más seria en las áreas de Matagalpa, Estelí y Ocotal y en las áreas montañosas al sur de Managua (Leonard,1986).

En Panamá, la erosión más severa se presenta en las tierras altas volcánicas de la provincia de Chiriquí, en las tierras altas de la vertiente pacífica, región central, occidental y metropolitana; se han registrado en algunas regiones pérdidas de suelo tan altas de hasta $2,000 \text{ tha}^{-1}$ año (Leonard, 1986).

2.3 Determinación de Cuencas Prioritarias

La identificación de áreas críticas, en una unidad geográfica determinada, presupone un proceso de jerarquización de las mismas, de acuerdo a variables biofísicas, socioeconómicas e institucionales, a fin de lograr la definición de estas áreas para su respectivo tratamiento; posibilitando la intervención del hombre, considerado como elemento protagónico del manejo de los recursos naturales y del uso de la tierra.

Lo anterior señala la importancia de la utilización de metodologías que permitan conocer las áreas problemáticas, a fin de caracterizarlas, para definir estrategias de manejo, priorizar actividades y formular directrices pragmáticas de desarrollo en dichas áreas, que promuevan el uso sostenido de los recursos con el menor impacto ambiental posible (Faustino, 1987).

Existen varios antecedentes de propuestas metodológicas para identificar y priorizar áreas críticas a nivel de cuencas hidrográficas y recursos afines, la metodología que se utilizó en este trabajo fue la propuesta por el Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras (CIDIAT), del Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables de Venezuela, la cual ha sido utilizada en Costa Rica (Olaya, 1985 y Faustino, 1987), en Panamá (Aguilar, 1988) y en Guatemala (Arce, 1989).

El sistema de análisis en estos casos, se realizó en forma tabular convencional, la misma contiene una estructura factible de análisis espacial (cartografía, mapas, áreas); que puede realizarse con un sistema de información geográfica.

2.4 Los Sistemas de Información Geográfica

El desarrollo de los sistemas de información geográfica se inicio en Canadá en el año de 1963 y fue iniciado por Robert Tomlinson, quien es considerado como el padre de los Sistemas de Información Geográfica, al desarrollar el CSIG (Canadá Geographic Information Systems) destinado al mantenimiento de un inventario de recursos naturales a nivel nacional (Coppock y Rhind, 1992).

Los SIG basados en computadoras han sido usados desde el año 1960, aunque sus predecesores manuales datan por lo menos de 100 años atrás. La mayoría fueron originados en Norte América por instituciones como el US Bureau of the Census, el US Geological Survey, el Harvard Laboratory for Computer Graphics y otras empresas privadas (Coppock, 1992).

2.4.1 Definición de los SIG

La definición de los sistemas de información geográfica es todavía un tema de controversia, se han realizado debates acerca del origen del término y la fecha de inicio de esta tecnología. El desarrollo de los SIG se inicio hace 30 años, como se mencionó anteriormente, desde esa época a existido un rápido avance teórico, tecnológico y organizativo, culminando con los mayores avances en los últimos 5 años (Maguire, 1992).

Existen varias definiciones de los SIG de las cuales Maguire (1992) hizo una selección que se presenta a continuación:

- Un sistema para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar datos que están espacialmente referenciados a un sistema de coordenadas de la tierra.
- Cualquier grupo de procedimientos manuales o computarizados, utilizados para almacenar y manipular datos referenciados geográficamente.
- Un poderoso grupo de herramientas para coleccionar, almacenar, recuperar, lo mismo que transformar y desplegar datos espaciales del mundo real.
- Una tecnología de información que almacena, analiza y despliega datos espaciales y no espaciales.
- Un sistema de base de datos, en el cual la mayoría de los datos están espacialmente referenciados y sobre el cual opera una serie de procedimientos, con el objeto de responder preguntas acerca de entidades espaciales en la base de datos.

Congalton (1992), define un SIG como un sistema que permite la entrada, almacenamiento, manipulación, análisis y despliegue de datos espaciales y no espaciales, los cuales son representados por puntos, líneas y polígonos que tienen atributos y topología asociados. Esta puede considerarse como una de las definiciones más completas de sistemas de información geográfica.

2.4.2 Representación de los Datos en un SIG

Los datos geográficos pueden ser representados en dos tipos de formato, uno que almacena los datos en unidades conocidas como pixel, éste es el formato raster o cuadrícula, donde cada pixel se encuentra referenciado a un sistema de coordenadas, el tamaño de las celdas o cuadrículas puede variar, además se debe considerar que la resolución espacial de los datos esta determinada por el tamaño del pixel. El formato raster es fácil de manipular o computar pero requiere de una gran capacidad de almacenamiento.

Los datos geográficos también pueden ser representados por vectores, este formato utiliza una serie de puntos para definir los límites del objeto de interés. Este tipo de datos puede requerir menos capacidad de almacenamiento y es preferible con propósitos de despliegue, pues, mantiene la forma exacta del objeto, sin embargo, algunos cálculos son difíciles y lentos de realizar.

2.4.3 Componentes de un SIG

Los sistemas de información geográfica comprenden 4 elementos básicos: equipo, programas, datos y los técnicos y/o usuarios. Los 2 primeros elementos, el equipo y los programas existen en una gran variedad de modelos y posibilidades; el equipo puede ir desde una sencilla microcomputadora personal, hasta una estación de trabajo de alta capacidad, por otro lado los programas varían en la organización, capacidad y diseño.

El tercer elemento importante en un SIG son los datos, en muchos aspectos los datos son un recurso crucial, caros de coleccionar, almacenar y manipular y siempre se necesitan grandes

cantidades de información en los análisis; por último, el más significativo elemento del SIG es el personal técnico y los usuarios, que son los responsables de diseñar, implementar y hacer uso de los SIG (Maguire, 1992).

2.4.4 Los SIG y las Imágenes de Sensores Remotos

Los métodos de percepción remota, se basan en el hecho de que cada elemento en la naturaleza, tiene su propia y única distribución de radiación emitida, reflejada o absorbida (Deagostini, 1975).

La percepción remota se define como la ciencia y el arte de adquirir información de los objetos o fenómenos sin tomar contacto físico con ellos (Segovia, 1988).

El lanzamiento de los primeros satélites, para el levantamiento de los recursos de la tierra, representan el mayor avance tecnológico para el estudio y evaluación de los recursos naturales (CIAF, 1981).

Una de las bases fundamentales, para hacer una correcta planeación del manejo de los recursos naturales, es el inventario del uso actual de los mismos, el cual puede ser realizado con la ayuda de los sensores remotos (Saborío, 1988).

Ha sido precisamente con este objetivo, que en los últimos 20 años se han logrado grandes avances tecnológicos, que permiten explorar extensas superficies terrestres, mediante el uso de instrumentos transportados por aeronaves (helicópteros, aviones, dirigibles) y más aún, todo nuestro planeta en su conjunto, por medio de laboratorios transportados que orbitan la tierra (Segovia, 1988).

Los adelantos tecnológicos de la informática y sus aplicaciones a la agricultura, en los últimos años, han permitido el desarrollo de los sistemas de información geográfica (SIG), como también un notable avance en el proceso y clasificación de las imágenes de los sensores remotos, que pueden registrar y monitorear de manera casi permanente la cobertura de la tierra.

Considerando lo anterior, y debido a la disminución en el costo del equipo y los programas, las imágenes de los sensores remotos y los sistemas de información geográfica, se han convertido en los últimos años, en una revolución en la evaluación de los recursos naturales, por su versatilidad en cuanto a posibilidades de análisis precisos, sirviendo a su vez como una valiosa herramienta para la toma de decisiones, en la planificación del manejo, aprovechamiento y rehabilitación de los recursos naturales para una producción sostenida.

2.4.5 Aplicaciones de los SIG en la Evaluación de los Recursos Naturales

Los adelantos tecnológicos recientes en el desarrollo de los SIG, tanto en equipo como en programas y técnicas de captura de los datos, han revolucionado sus aplicaciones en la planificación y manejo de la tierra.

El manejo integrado de los recursos naturales, requiere de una gran cantidad de información para diferentes fines: generación de hipótesis, evaluación de los resultados producto de la instrumentación de políticas de manejo, evaluación del estado o situación de diversos recursos, estudios de riesgos naturales, evaluación de impacto ambiental y otros (Dengo, 1988).

La tecnología de los sensores remotos en combinación con un sistema de información geográfica, permite manejar la información actualizada y modelar los datos espaciales; que en el caso de la evaluación de tierras, permite hacer una proyección a futuro de los usos de la tierra que se están recomendando, así como estimar el impacto de la tendencia que el uso actual de la tierra tiene sobre los recursos naturales.

En este sentido, los sistemas de información geográfica, constituyen una herramienta de gran utilidad en el análisis de la información para la toma de decisiones y la elaboración de planes, como también, para la evaluación de la puesta en marcha de los planes de manejo en una región o una cuenca. El objetivo de este sistema es: tener una ubicación espacial del problema en estudio, información organizada, actualizada, instantánea, lo mismo que permite realizar modelaciones complejas (Saborio, 1991).

Los SIG tienen aplicación en diferentes disciplinas del conocimiento humano, en manejo de recursos naturales en el mapeo e inventario, determinación de áreas con riesgo de inundaciones; en seguridad pública para la determinación de rutas para evacuación, zonas contaminadas por lluvia ácida; en forestería para determinar la tasa de deforestación, áreas con mayor potencial para determinado uso.

A continuación se presentan algunos ejemplos de la utilización de los SIG:

a) Manejo Forestal

Maclean *et al* (1992), desarrollaron un proyecto para evaluar los cambios ocurridos en el recurso forestal, en el norte de la península de Michigan durante el período comprendido

entre el año de 1986 a 1989, utilizando los sistemas de información geográfica y las imágenes de sensores remotos Landsat T.M.

Para la clasificación de las imágenes y análisis espacial se uso el programa Earth Resources Data Analisis System (ERDAS), el análisis espacial se realizó en formato de raster y el tamaño del pixel utilizado fue de 30m * 30m.

La evaluación de los cambios de uso ocurridos durante el período, se realizó comparando los mapas de uso correspondientes al año de 1986 y 1989 mediante una tabla cruzada; esto permitió evaluar y calcular de manera rápida y precisa, las áreas que habían sufrido un cambio en el uso durante el período, ésta información fue también presentada en forma de mapas.

b) Erosión de los Suelos

Hyman (1990), utilizó las imágenes de sensores remotos y un sistema de información para la identificación de áreas críticas como fuente productora de sedimentos contaminantes, en South Fork, New River, Carolina del Norte.

En la identificación de éstas áreas, se utilizó la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelos (EUPS), para estimar la pérdida potencial de suelos; en este proyecto se usó el programa ERDAS para procesar la imagen digital y para realizar el análisis espacial, se usó el formato raster y una cuadrícula de 30*30m. El análisis de la información de los diferentes parámetros de la EUPS permitió obtener un mapa de erosión potencial, el cual muestra para los diferentes tipos de cobertura y pendientes su correspondiente potencial de erosión como también su ubicación geográfica respectiva.

Esta investigación demostró la utilidad de los sensores remotos y los sistemas de información geográfica para la modelación de la pérdida del suelo, además de la importancia de la información generada que debe ser usada por los responsables de la planificación de proyectos y actividades en el área.

Mediante la simulación de los cambios en la cobertura, topografía y uso de la tierra pueden evaluarse los efectos producidos en el área, lo que permitirá a los decisores elegir las alternativas que ocasionen el menor daño posible o que garanticen un uso sostenido de los recursos.

Otro ejemplo de la aplicación de los sensores remotos y los SIG en la evaluación de la erosión de los suelos, es el trabajo realizado por Hassan Anys *et al* (1992), en la cuenca Aricha localizada al sureste de Settat, Marruecos.

El objetivo del estudio fue cuantificar y mapear la pérdida anual de suelos y calcular la cantidad de sedimentos depositados en la red de drenaje. El modelo usado en este trabajo fue la Ecuación Universal de la Perdida de Suelos (EUPS), utilizando los datos provenientes de diferentes fuentes: como los sensores remotos, modelo de elevación digital, datos cartográficos, meteorológicos y evaluación de campo.

La metodología consistió en integrar todos los factores de la USLE y la tasa de liberación de sedimentos en un sistema de información geográfico (PAMAP), los productos obtenidos del análisis de la información fueron mapas que contienen información acerca de la pérdida actual de suelos, de la erosión potencial y de la tasa de liberación de sedimentos.

Las conclusiones de este trabajo, señalan la importancia del uso de los sensores remotos en áreas grandes, indicando que su uso es más eficiente y real que la extrapolación de datos provenientes de varias observaciones individuales en el campo, pero que los datos de sensores remotos y sistemas de análisis por computadoras no reemplazan las evaluaciones hechas en el campo cuando estas son precisas y detalladas.

En Costa Rica, Bolaños y Fallas (1991), realizaron un trabajo para evaluar el riesgo de erosión potencial de una cuenca, utilizando el programa IDRISI y el sistema UIM propuesto por el CENICAFE en Colombia.

/ La susceptibilidad de los suelos a la erosión, se determinó a partir de la clasificación de suelos elaborada por el ICE (1989); a cada unidad de suelo se le asignó un grado de susceptibilidad a la erosión y se representaron en un mapa escala 1:50,000. Estos mapas fueron combinados con los de agresividad de la lluvia, para obtener el mapa Índice Potencial de Erosión.

Las conclusiones presentadas en éste trabajo, señalan la utilidad de los sistemas de información geográfica para el procesamiento de grandes y complejos volúmenes de información espacial, que permite evaluar el estado actual y modelar los posibles efectos producidos por cambios en los diferentes factores considerados en la metodología.

Arana (1992), utilizó un sistema de información geográfica para evaluar la erosión hídrica en la subcuenca del río Pensativo, Guatemala. En sus conclusiones señala que la tecnología de los SIG, le permitió aplicar con facilidad la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelos, facilitándole el agrupamiento espacial de los suelos por rangos de erosión y cuantificar los sedimentos en cada unidad de suelo.

Señala además, la importancia de los SIG como herramienta valiosa para el almacenamiento, procesamiento, recuperación, análisis y despliegue de información espacial, facilitando la modelación de diferentes procesos a nivel de cuenca.

c) Modelación Hidrológica

En Costa Rica, Morera y Fallas (1992) realizaron una aplicación de los sistemas de información geográfica en el modelaje hidrológico a nivel de cuenca. En éste trabajo se señala la importancia práctica de la utilización de los SIG en la solución de los problemas hidrológicos, resaltando el contexto espacial del análisis realizado mediante un SIG, que generalmente no es considerado en los modelos hidrológicos tradicionales.

También se indica que mediante la utilización de los SIG, se puede incrementar el grado de precisión espacial de los parámetros y también facilita la manipulación de la información georeferenciada para grandes extensiones, dando mayor validez a los resultados de las modelaciones.

Los resultados de los trabajos anteriores, reafirman la importancia de los SIG, como una herramienta valiosa para analizar e integrar la información proveniente de varias fuentes como: mapas de cobertura y uso de la tierra, información topográfica, suelos, ríos, carreteras, etc.

El análisis y modelación de los datos, sirve como un soporte valioso que ayuda a científicos y decisores a evaluar diferentes alternativas y estimar los posibles efectos o impactos que los proyectos o actividades propuestas pueden ocasionar en una región, permitiéndoles impulsar aquellos proyectos que produzcan los mayores beneficios sociales y económicos, con el menor daño ambiental posible.

2.6 Descripción del Area de Estudio

2.6.1 Localización de la Cuenca del Reventado

El trabajo de investigación se realizó en la cuenca del río Reventado, ubicado al norte de la ciudad de Cartago, en el flanco suroeste del volcán Irazú, entre las coordenadas geográficas $83^{\circ} 51' 00''$ a $83^{\circ} 55' 53''$ de longitud oeste y de los $9^{\circ} 52' 16''$ hasta $9^{\circ} 58' 46''$ de latitud norte, que corresponden a las coordenadas Lambert Norte 206,000 a 218,000 N y 543,000 a 552,000 E de la Hoja topográfica Istarú (IGN 3445 - IV) (Figura 1).

El río Reventado inicia su curso al suroeste y sureste de los cerros Sapper y Retes respectivamente, a unos 2 Km al suroeste del cráter principal del volcán Irazú, a 3432 metros sobre el nivel del mar. Aproximadamente 45% de la cuenca superior tiene pendientes superiores al 25% y en algunos sitios puede alcanzar hasta el 75%; el cauce superior del río Reventado es un típico río de montaña con un cauce que raramente excede 1 a 2 metros de ancho y 15 cm de profundidad (Fallas, 1992?).

La precipitación y evapotranspiración potencial promedio anual es de 1,687 mm y 1,660 mm respectivamente, la época seca se extiende desde enero hasta abril y la época lluviosa va desde mayo a diciembre, el mes más seco es marzo con 10.3 mm y el más húmedo octubre con 273.9 mm. La temperatura oscila desde 1°C en los meses de enero y febrero como mínima, hasta los 26.5°C en el mes de junio como máxima (Estación Sanatorio Duran) con un promedio anual de 13°C . La humedad relativa que varía desde 77% hasta 87%.

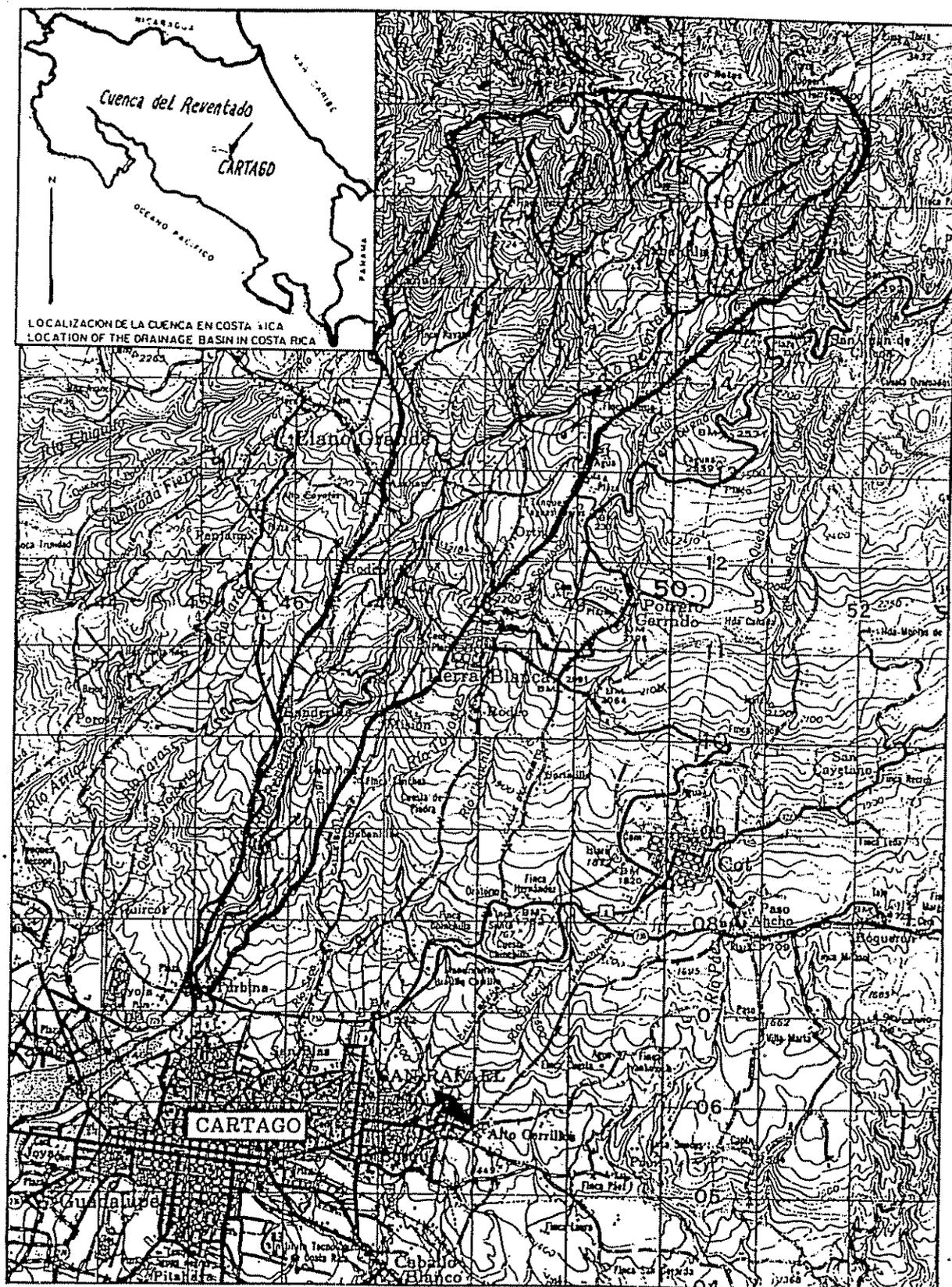


Figura 1 Localización de la Cuenca del Río Reventado

La cuenca tiene una extensión de 2,152.26 ha, el cauce principal tiene una longitud de 12 Km caracterizado por tener fuertes pendientes y un corto período de concentración. Por sus características topográficas y geológicas la cuenca en general presenta laderas inestables que pueden ocasionar derrumbes y avalanchas al presentarse un temporal o un período lluvioso extremo, lo que significa un peligro de inundación eminente para la ciudad de Cartago.

2.6.2 Geología de la Cuenca del Río Reventado

El basamento en el cual se sitúa el volcán Irazú corresponde probablemente a rocas severamente plegadas y falladas en el terciario, que incluye rocas sedimentarias como conglomerados, limolita, caliza y arenisca y rocas volcánicas como aglomerados, lavas y tobas (ICE, 1986).

El macizo del Irazú, al igual que los núcleos volcánicos de la Cordillera Central, esta formado de lavas piroclásticas y laháricas. Las rocas expuestas representan los depósitos originados en los últimos ciclos de erupción que corresponden del pleistoceno hasta el reciente.

Afloran en la cuenca superior secuencias de lavas, escorias y aglomerados que por lo general se encuentran en buen estado físico. Los depósitos laháricos comprenden grandes masas de material heterogéneo envuelto en una matriz tobacea o arcillosa, a veces intercalado entre delgadas coladas de lava y capas de escoria y toba. Las zonas de material lahárico en la cuenca superior corresponden a lugares de gran inestabilidad, algunos de los cuales se han empezado a deslizar.

Se considera que la cuenca superior del Reventado presenta poco plegamiento y fallamiento. Algunas coladas de lava presentan buzamientos constantes al sur que varían de 5° a 20° y concuerdan con la topografía regional. Esta forma de inclinación de la roca se debe a la inclinación original en que fueron depositadas y no a fuerzas tectónicas.

2.6.3 Suelos y Uso de la Tierra

La mayoría de los suelos se han desarrollado en general de materiales volcánicos recientes (Typic dystrandepts, Litic dystrandepts, Vitric dystrandepts) algunos de los cuales se clasifican actualmente como andisoles; además suelos recientes superficiales localizados en los afloramientos rocosos y pequeños valles aluviales clasificados como entisoles.

Los suelos originados de cenizas volcánicas son profundos o muy profundos, de texturas medias o livianas, porosos bien drenados, fértiles, relieve ondulado y escarpado, con algunas áreas sedimentarias, deslizamientos en masa por soliflucción e irregularidades en el terreno, provocadas por un frente de lava o corrientes de lodo. Existen algunas diferencias entre los suelos más recientes, ubicados río arriba de las vertientes, y los suelos más evolucionados localizados en la parte media y baja de la cuenca, la principal diferencia se presenta en la textura (Cuadros 24, 25, 26, 27 y 28).

En la parte media y baja de la cuenca los suelos son utilizados para el cultivo de hortalizas como papa, cebolla, zanahoria, lechuga, remolacha y otros, las prácticas de cultivo están lejos de ser conservacionistas y es frecuente encontrar sistemas de cárcavas en la mayoría de los lotes, las camas o eras donde se establecen los cultivos se construyen con pendientes de 6 a 8% de pendiente.

En las zonas más inclinadas se observan cárcavas profundas y deposición de sedimentos en las áreas más planas del terreno, a la orilla de los lotes y en la carretera. Una de las razones que agrava el problema de la erosión, es que generalmente el inicio de las lluvias coincide con la época en que los suelos se encuentran desnudos porque han sido labrados recientemente. Según Melo (1991), la zona Norte de Cartago ha sido declarada en estado de emergencia debido a que las tasas de erosión registradas sobrepasan las 100 tha^{-1} año.

En las zonas más escarpadas y de suelos superficiales prevalece la ganadería; pero en general se observa en toda la cuenca una tendencia a sustituir los pastos por el cultivo de hortalizas. Las zonas más escarpadas o abruptas de la cuenca y cañones de los ríos se encuentran cubiertas por charrales, bosques secundarios y bosques primarios redictuales.

La parte alta de la cuenca, se encuentra cubierta casi completamente por una mezcla de bosque secundario, áreas de reforestación y unas pocas especies de bosque primario, esto ofrece una cobertura completa al suelo ya que existe una interestratificación de especies y una capa de liter u hojarasca que cubre completamente la superficie del suelo, eliminando la pérdida de suelo por erosión laminar. Esta zona pertenece casi en su totalidad al parque nacional Prusia, y sirve para la preservación de la biodiversidad, estabilización de las laderas y captación de agua para consumo humano (potable) y riego para las comunidades localizadas en la zona.

2.6.4 Hidrología de la Cuenca del Reventado

El sistema principal de drenaje de la cuenca lo constituye el río Reventado que nace en la sección suroeste del volcán

Irazú, además forman la red de drenaje el río Retes y la quebrada de Pavas más una serie de arroyos y canales que conducen el agua durante las tormentas formando una densa red de drenaje.

El río Reventado es un pequeño riachuelo que durante la época seca tiene un caudal de 100 ls^{-1} , pero durante la estación lluviosa se convierte en un torrente de montaña, que el 9 de diciembre de 1963 alcanzó un caudal pico de $407 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (ICE, 1964).

La parte alta de la cuenca se caracteriza por sus fuertes pendientes, en las proximidades de los cerros Sapper, Retes y Cabeza de Vaca, en la que existen pendientes mayores del 100%.

La cuenca tiene una forma trapezoidal desde la parte superior hasta la confluencia con la quebrada de Pavas, y esta formada hasta este punto, por las subcuencas del río Retes (4.8 km²), quebrada de Pavas (3.6 km²) y la del mismo Reventado (5.7 km²). Desde el punto anterior hasta el puente Bailey (Turbina) tiene una forma rectangular alargada en el sentido del flujo del río, con pendientes más suaves, pero que se encuentra disectado por un profundo cañón por donde drena el río.

2.6.5 Aspectos Socioeconómicos Generales

En la cuenca del río Reventado o en sus proximidades se encuentran localizadas diferentes comunidades, entre ellas están los distritos de Tierra Blanca, Llano Grande y el Carmen pertenecientes al cantón de Cartago; también el distrito de Potrero Cerrado y la comunidad de San Juan de Chicué que pertenecen al cantón de Oreamuno. Además existen pequeños caseríos y fincas ganaderas que desarrollan sus actividades dentro de la cuenca (Figura 1).

En el Cuadro 1, se presentan las estadísticas del censo de población (1992) para los distritos de Tierra Blanca, Llano Grande y Potrero Cerrado.

Cuadro 1. Población Total y por Sexo, Densidad Poblacional (Enero 1992)

Distrito	Población	Hombres		Mujeres		Densidad Hab/km ²
		Hab	%	Hab	%	
Tierra Blanca	4604	2350	51.04	2254	48.96	483.0
Llano Grande	3035	1562	51.46	1473	48.54	77.5
Potrero Cerrado	1283	652	50.81	631	49.19	57.5

Fuente: Dirección General de Estadística y Censo. 1992.

Este cuadro señala el distrito de Tierra Blanca como la comunidad con mayor crecimiento y densidad poblacional, según los registros del censo poblacional presentado por Bel Ingeniería (1987), donde señala que esta comunidad tuvo en el período de 1963 a 1973 una tasa de crecimiento de 14.7% y de 1973 a 1984 esta tasa aumentó hasta un 25.2%.

También el estudio de Bel Ingeniería (1987), señala que la población en la zona es relativamente joven pues en todos los distritos, más del 50% de la población es menor de 19 años; la principal actividad en la zona es agropecuaria; la población económicamente activa es superior al 65% de los cuales el 75% se dedica a las labores agropecuarias.

En cada uno de los distritos existe un puesto de salud, que presta los servicios básicos; además en Tierra Blanca y Llano Grande existe un centro de nutrición. En el aspecto educativo, el porcentaje de analfabetismo es de 7.9%, por debajo del promedio nacional que es de 10.1% para el área rural.

Los productores son en su mayoría propietarios de las parcelas donde trabajan, el tamaño promedio de los lotes dedicados a la producción de hortalizas es de 3 ha., Las fincas ganaderas tienen extensiones mucho mayores.

La zona cuenta con una red de caminos que permiten el acceso a todas las comunidades y fincas productoras, aunque presentan problemas de mantenimiento en los caminos vecinales. Todas las comunidades cuentan con el servicio de agua potable y energía eléctrica.

III MATERIALES Y METODOS

3.1 Materiales

Para la realización de este trabajo se utilizó el siguiente material:

3.1.1 Mapas e Información de Sensores Remotos:

- Fotografías aéreas (1989), escala 1:20,000, (I.G.N.)
- Hoja topográfica Istarú 3445 IV, (1981), escala 1:50,000 IGNCR.
- Hojas topográficas (1991), de Tierra Blanca, Llano Grande, Reventado, Ochomogo, Tejar, Tobosi, Carpintera; escala 1:10,000, IGNCR.
- Mapa de uso del suelo (1991), de Tierra Blanca, Ochomogo, Reventado, Tobosi, Tejar escala 1:10,000, IGNCR.
- Mapa de suelos 1:200,000 (SEPSA)
- Mapa geológico escala 1:50,000
- Mapa geomorfológico escala 1:50,000
- Mapa de uso potencial (SEPSA) escala 1:200,000

3.1.2 Equipo Cartográfico

- Estereoscopio
- Mesa de luz
- Planímetro

3.1.3 Equipo para Trabajo de Campo

- Cámara fotográfica
- Binoculares
- Altimetro
- Nivel o clinómetro

- Geographic positioning system (GPS)
- Cilindros para densidad aparente
- Equipo para muestreo de suelos y elaboración de calicatas

3.1.4 Equipo de Computación

- Microcomputadoras del Proyecto RENARM/ CUENCAS, Centro de Cómputo
- SIG para digitalización, modelación y análisis espacial (IDRISI y TOSCA)
- Mesa digitalizadora
- Impresora (Epson LX 810, Tektronix 4696, láser)
- Plotter

3.1.5 Información General

- Datos climáticos
- Recopilación de información de trabajos realizados en la cuenca del río Reventado
- Estudios de suelos
- Estudios de riegos
- Estudios geológicos

3.1.6 Análisis de Laboratorio

En el laboratorio de suelos del CATIE, se realizaron los análisis de textura, materia orgánica, densidad aparente, densidad real, retención de humedad a 1/3 bar, retención de humedad a 15 bares, necesarios para completar la información requerida para cumplir con los objetivos de este trabajo.

3.2 Metodología

3.2.1 Actividades

Para la realización de este trabajo se llevaron a cabo las siguientes actividades:

a) Reconocimiento de Campo

Se realizó un recorrido preliminar de la cuenca para conocer la problemática general en el área de estudio; las características biofísicas, el uso actual, tipo de cultivos, prácticas de cultivo, accesibilidad, identificación de puntos estratégicos, instituciones involucradas, fuentes de información.

b) Recopilación de la Información

En esta etapa se hizo una recopilación de los trabajos realizados en la cuenca tales como tesis, planes de manejo, información meteorológica, mapas de suelos, geología, geomorfología, uso actual de la tierra, imágenes de sensores remotos (fotografías aéreas), estudios de suelos, riegos y otros.

Se visitaron instituciones que realizan trabajos, que brindan asistencia técnica o que tengan presencia en la cuenca en diversas actividades (SENACSA, MAG, ICE, SENARA).

c) Análisis y procesamiento de la información

3.3 Metodos de Análisis

3.3.1 Modelo de Elevación Digital

El modelo de elevación digital de la cuenca se construyó mediante la digitalización de las curvas de nivel de la hoja cartográfica Istarú, escala 1:50,000; comprendidas entre las coordenadas Lambert Norte, desde 544,000 hasta 553,000 Este y desde 206,000 hasta 218,000 Norte.

la digitalización de las curvas de nivel se efectuó usando el programa Tosca versión 4.01, utilizando como identificador para cada curva, su respectivo valor de altura sobre el nivel del mar. El archivo creado con las curvas de nivel es un archivo vectorial, el cual debió ser convertido en un archivo raster por medio del módulo LINERAS. Aquí se definió el tamaño del pixel, lo mismo que el número de columnas e hileras que tendría la imagen.

En este caso el tamaño de pixel fue de 5m * 5m, de manera que al momento de hacer la conversión a raster, dos curvas de nivel separadas a 20m no pueden compartir el mismo pixel. Una vez obtenida la imagen raster, se construyó el Modelo de Elevación Digital usando el modulo INTERCON.

Luego este archivo fue comprimido por un factor de 6, usando el modulo CONTRACT, así el tamaño de la cuadrícula quedo de 30m * 30m y representa el promedio de 36 pixel vecinos de 5m * 5m.

3.3.2 Determinación del Uso de la Tierra

El mapa de uso de la tierra fue elaborado a partir de los mapas editados por el proyecto JICA-IGNCR (1991), escala 1:10,000 y fotografías aéreas (1989), escala 1:20,000;

realizando además una comprobación de campo para verificar y rectificar las diferentes unidades de uso clasificadas en el mapa.

Los mapas de uso de la tierra utilizados fueron: Ochomogo, Reventado y Tierra Blanca, de los cuales solamente se digitalizó la ventana que contiene la parte correspondiente a la cuenca del río Reventado. Estos archivos posteriormente se fusionaron mediante el módulo Append del programa Tosca y se obtuvo un archivo que cubre la parte baja y media de la cuenca hasta las comunidades de Llano Grande y Tierra Blanca.

La parte del mapa de uso de la tierra que cubre el área superior de la cuenca, fue elaborado a partir de las fotografías aéreas, se hizo la fotointerpretación de los pares estereoscópicos que cubren esta zona y se identificaron 7 clases de uso: bosque, charral, hortalizas, pasto, pasto con árboles, plantación forestal y área urbana.

La metodología empleada se describe a continuación:

- 1.- Se cubrió con una lámina transparente la fotografía derecha de cada par estereoscópico.
- 2.- Se marco el centro de cada fotografía para realizar el mínimo trabajo de superposición con el estereoscopio.
- 3.- Se trazaron las unidades de uso de la tierra con un marcador fino.
- 4.- Se construyó una cuadrícula, con líneas separadas cada 2 cm, para poder digitalizar y georeferenciar las unidades de uso.
- 5.- Fueron señalados por lo menos 6 puntos de control en cada fotografía, que corresponden a puntos específicos e identificables en la hoja cartográfica Istarú.

- 6.- Se digitalizaron las unidades de uso de la tierra y los puntos de control de todas las fotografías y se uso la cuadrícula de 2cm * 2cm como sistema de referencia.
- 7.- Utilizando un archivo de correspondencia entre las coordenadas de la cuadrícula y las coordenadas Lambert que corresponden a los puntos de control; se corrió el módulo RESAMPLE V, que permite la corrección de la distorsión y el cambio del sistema de referencia de las fotografías al sistema de coordenadas Lambert Norte de Costa Rica, mediante una transformación polinomial de grado 2.
- 8.- Mediante el Módulo Append File del programa Tosca, se unieron todos los archivos de las fotografías y se obtuvo un archivo de uso de la tierra que cubre la parte alta de la cuenca. En este archivo tuvo que hacerse un trabajo de edición, para corregir los errores originados al hacer la fusión; estos errores tuvieron un valor aproximado en promedio de 150 m.
- 9.- Por ultimo se unió el archivo elaborado a partir de los mapas de uso con el archivo correspondiente a las fotografías para obtener un archivo general que contiene todas las unidades de uso de la cuenca.
- 10.- Este archivo debió ser editado y construida su topología, se revisó que todos los nodos estuvieran unidos y asignado el valor correspondiente para cada arco del polígono que esta a la izquierda o a la derecha de cada arco.
- 11.- Una vez realizado lo anterior, se corrió el módulo CYCLE del programa Tosca, para elaborar los polígonos que corresponden a cada unidad de uso y posteriormente mediante el módulo POLYRAS se convirtió este archivo en una imagen raster.

3.3.3 Determinación de la Capacidad de Uso de la Tierra

El modelo utilizado para la determinación de la capacidad de uso de la tierra, fue diseñado para usarse en países tropicales y subtropicales, se originó en Taiwan y se desarrolló en Jamaica desde 1968 (Sheng, 1990). Se eligió este modelo porque ha sido utilizado en diferentes países (Honduras, Jamaica, Tailandia) y ha tenido buena aceptación por los usuarios; además la metodología es sencilla, requiere de pocos parámetros, puede ser fácilmente utilizada e interpretada por técnicos y usuarios; y también, el análisis espacial de los parámetros puede ser realizado mediante un SIG.

a) Consideraciones Básicas

- 1.- La clasificación sirve principalmente para fines agrícolas, pero no es una clasificación de la aptitud de los suelos para determinados cultivos.
- 2.- Se basa en factores limitantes permanentes: pendiente, suelo, erosión y clima. No se consideran limitaciones permanentes aquellos factores que se pueden corregir.
- 3.- La clasificación de la capacidad no es una catalogación de la productividad, los suelos no se agrupan por su uso más lucrativo.
- 4.- La tierra se clasifica de acuerdo al uso más intensivo que pueda practicarse sin riesgo, un uso menos intensivo es permitido y un uso más allá de su capacidad debe ser desalentado.
- 5.- Las clases de capacidad son homogéneas solamente con respecto al grado de riesgo en el uso agrícola. Cada clase puede incluir muchos tipos diferentes de suelos.
- 6.- La tierra debe reclasificarse cuando se establecen proyectos importantes de recuperación o se introducen prácticas de cultivos conservacionistas.

b) Supuestos Adicionales

Es necesario considerar algunos supuestos adicionales para adaptar la metodología a las condiciones socioeconómicas y biofísicas de las tierras montañosas marginales en los países tropicales o subtropicales en desarrollo.

- 1.- La mayoría de los países en desarrollo tropicales o subtropicales poseen problemas de desempleo e insuficiente producción de alimentos. Cualquier tierra que pueda ser cultivada a mano sin riesgos debería clasificarse como tierra apta para cultivos.
- 2.- Debido a las fuertes pendientes y la intensidad de la lluvia en estas regiones, el uso de prácticas de conservación de suelos debe ser un requisito cuando estas tierras son sometidas a cualquier tipo de labranza o cultivo.
- 3.- La clasificación de uso de la tierra debe ser rápida, sencilla y de fácil comprensión. Los mapas deberían ser fáciles de comprender por extensionistas y agricultores.
- 4.- En la clasificación de campo es importante emplear los principales factores limitantes que puedan medirse o compararse cuantitativamente, antes que usar descripciones cualitativas.

c) Otros Factores Limitantes

La pedregosidad, drenaje interno, nivel freático e inundación, se consideran generalmente en las metodologías de clasificación de la tierra, pero aquellos factores limitantes del suelo que se pueden corregir no deberían considerarse como limitaciones permanentes.

La tierra que es demasiado húmeda, tiene un drenaje deficiente, inundaciones ocasionales, es muy pedregosa, lo que limita permanentemente el cultivo o su tratamiento debería clasificarse para usos poco intensivos. En las pendientes con menos de 47% (25º), pueden usarse para pastos y en las pendientes mayores de 47% (25º), deberían tener una cubierta forestal. Las tierras disectadas por cárcavas que impiden cualquier actividad de labranza deberían tener una cubierta forestal permanente.

La metodología propuesta por Sheng (1990), hace una clasificación de las pendientes, profundidad del suelo y del uso de la tierra que se presentan a continuación en los Cuadros dos, tres y cuatro.

Cuadro 2 Clasificación de las Pendientes
(Sheng, 1990)

Clase	Grados	%	Descripción
1	< - 7º	< - 12%	Plano, o ligeramente plano
2	7º - 15º	12 - 27%	Ligeramente ondulado
3	15º - 20º	27 - 36%	Fuertemente ondulado
4	20º - 25º	36 - 47%	Muy fuertemente ondulado
5	25º - 30º	47 - 58%	Escarpado
6	> - 30º	> - 58%	Muy escarpado

Cuadro 3 Clasificación de la Profundidad
(Sheng, 1990)

Clase	Profundidad	Descripción
1	> - 90 cm	Profundo
2	50 - 90 cm	moderadamente profundo
3	20 - 50 cm	Superficial
4	< - 20 cm	Muy superficial

Cuadro 4 Clasificación del uso de la tierra (Sheng, 1990). Regiones húmedas tropicales y subtropicales

PENDIENT PROFUND.	Ligmente plano < 70	Ligmente. ondulado 70 - 150	fuertmente. ondulado 150 - 200	Muy fuert. ondulado 200 - 250	escarpado 250 - 300	Muy escarpdo > - 300
Profundo > - 90 cm)	C1	C2	C3	C4	FT	F
moderadamente profundo (50 - 90 cm)	C1	C2	C3	C4 P	FT F*	F
Superficial (20 - 50 cm)	C1	C2 P	C3 P	P	F*	F
Muy Superficial (< - 20 cm)	C1 P	P	P	P	F	F

*

Tierras forestales o para agroforestería

Resumen de las clases de uso:

- C1 : Tierra cultivable 1, pendiente hasta 70, requiere medidas sencillas de conservación de suelos como cultivos en curvas de nivel cultivos en fajas, barreras vivas, barreras de piedra etc.,
- C2 : Clase 2, pendiente entre 7 -150, prácticas de conservación más intensivas como acequias de ladera en combinación con barreras vivas, canales de desviación, terrazas.
- C3 : Clase 3, pendiente entre los 15 -200, prácticas de conservación más intensivas que la anterior, acequias de ladera, barreras vivas de leucaena y gandul, bancales escalonados.
- C4 : Clase 4, pendiente de 20 -250, puede usarse para cultivos en limpio con prácticas intensivas de conservación de suelos, las labores de cultivo se realizan casi todas manualmente.
- p : Pastizales, pastoreo controlado, rotación de potreros, adecuado localización de salitreros (comederos).
- FT(AF): Agroforestería, cultivos permanentes.
- F : Tierras forestales, bosque natural, paisajista, protección.

3.3.4 Modelación de la Erosión Potencial de la Cuenca

a) Aplicación de la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelos (EUPS)

Para estimar la pérdida de suelos en la cuenca, se utilizó la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelos, desarrollada por Wischmeier *et al* a partir de 1957 (Kirkby, 1984). Este modelo fue desarrollado en los EEUU, y es el modelo que ha tenido mayor aceptación y difusión en los países con problemas de erosión (González del Tánago, 1991).

Los diferentes factores de la EUPS se calcularon a partir de la información analizada, y se representaron en forma de mapas, el análisis espacial de la información se realizó usando el programa IDRISI del laboratorio de SIG del programa Recursos Naturales del CATIE.

b) Breve Descripción del Modelo

El modelo de la EUPS considera los siguientes factores: intensidad de la lluvia, características del suelo, inclinación y longitud de la pendiente, cobertura vegetal y prácticas de cultivo utilizadas.

La ecuación esta definida por:

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

Donde:

- A : Pérdida de suelo estimada por unidad de superficie
- R : Erosividad de las lluvias
- K : Erodabilidad del suelo
- L : Longitud de la pendiente
- S : Inclinación de la pendiente

C : Cobertura del suelo
 P : Prácticas de cultivo

c) Factor de Erosividad de las Lluvias (R)

El factor R es el índice de erosión pluvial, mide la energía cinética de la lluvia sobre la superficie del suelo, que actúa disgregando las partículas del suelo y compactando su superficie (González del Tánago, 1991).

La energía de las gotas de lluvia esta en función del tamaño de las gotas relacionadas a su vez con la intensidad de la lluvia; la expresión matemática para calcular este índice es la siguiente:

$$R = E \cdot I_{30}$$

siendo E la energía cinética del aguacero, estimada a su vez por la fórmula:

$$E = 210.2 + 89 \log I$$

R = Índice de erosividad de la lluvia (juliosm⁻² cm de lluvia)

E = Energía cinética de la lluvia (juliosm⁻²)

I = Intensidad de la lluvia (cmh⁻¹)

I₃₀ = Intensidad Máxima en 30 minutos de aguacero (cmh⁻¹).

d) Factor de Erodabilidad del Suelo (K)

Es una característica propia del suelo, ligada a su granulometría, porosidad, condiciones hidrológicas. El factor K de la EUPS cuantifica la erodabilidad del suelo mediante una expresión deducida experimentalmente y representa la tasa de erosión del suelo por unidad del factor R, cuando las condiciones de relieve y vegetación son consideradas standard

(parcela de 22.1 m de longitud, 9% de pendiente, mantenida en barbecho y cultivado en el sentido de la máxima pendiente) en estas condiciones los factores L, S, C y P equivalen a la unidad.

El factor K, también puede calcularse usando el nomograma de erodabilidad del suelo (Figura 2), o mediante la expresión matemática siguiente:

$$100K = 10^{-4} * 2.71M^{1.14} (12-a) + 4.20(b-2) + 3.23(c-3)$$

donde:

- K = Factor de erodabilidad
- M = (% de limo + % de arena muy fina) (100 - % arcilla)
- a = % de materia orgánica
- b = código de la estructura del suelo
- c = código de la permeabilidad del suelo

e). Factor Topográfico (LS)

Tanto la longitud como el grado de inclinación de la pendiente influyen en la tasa de erosión de un suelo. Wischmeier y Smith (1978) definen la longitud de la pendiente, como la distancia que recorre una gota de escorrentía desde que se forma en la divisoria hasta un cauce o una zona de sedimentación.

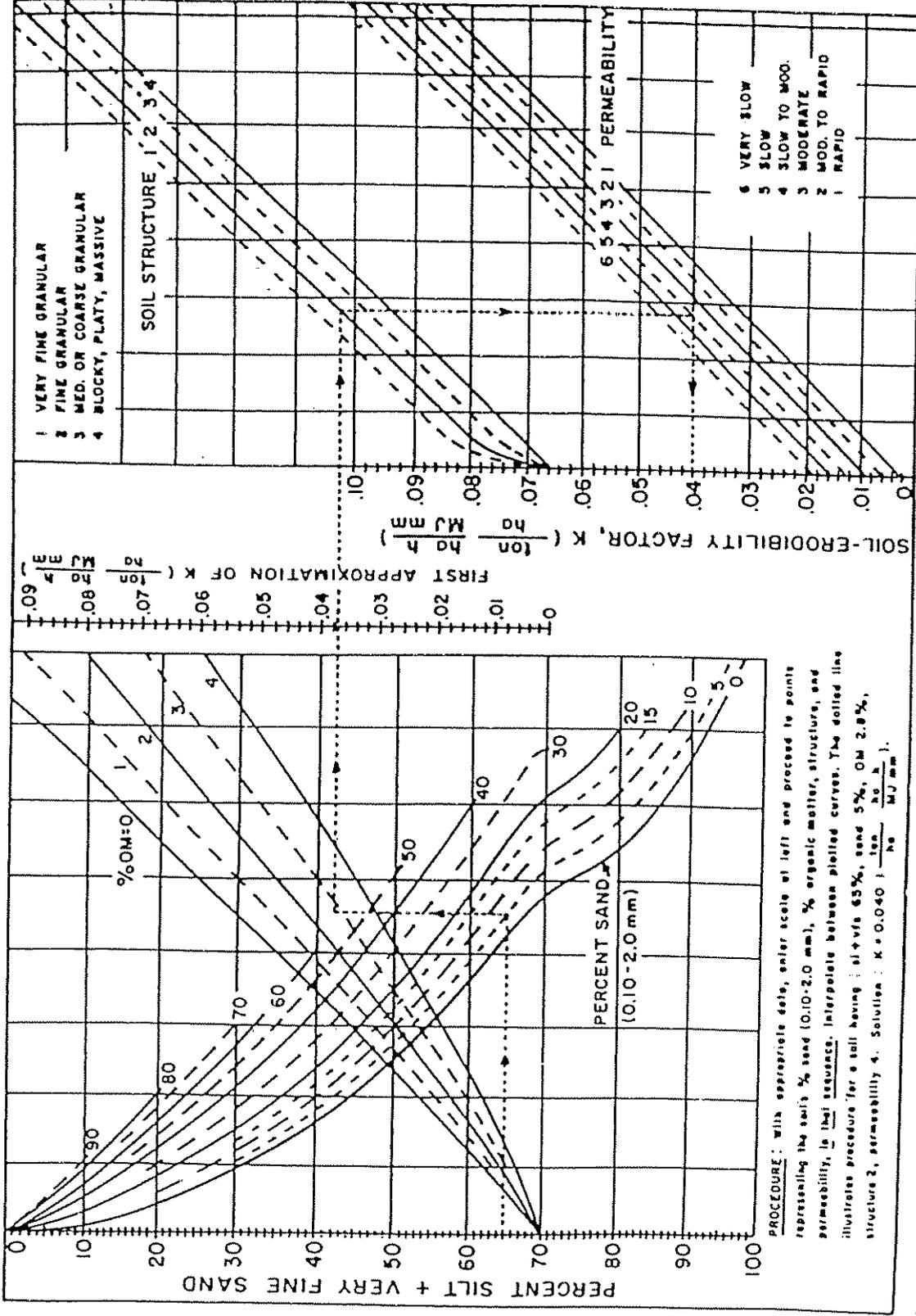


Figura 2 Erodibilidad del suelo del factor (K).

(Nomograma del factor de erodibilidad del suelo en unidades del sistema internacional).
 Fuente: Foster et al (1981)

La expresión que estima la influencia de la longitud de la pendiente sobre la erosión esta dada por:

$$L = (x/22.1)^m$$

donde:

L = factor de longitud de la pendiente

x = longitud de la pendiente (m).

m = exponente que depende de la pendiente

La influencia de la inclinación de la pendiente sobre la erosión de los suelos es importante; Smith y Wischmeier (1957) citados por Kirkby y Morgan (1984), determinaron que la pérdida del suelo estaba correlacionada con una descripción parabólica del efecto de la inclinación de la pendiente, al normalizar esta ecuación con una parcela standard de 9% de pendiente se obtuvo la siguiente expresión:

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

donde:

S = factor gradiente de la pendiente

s = gradiente de la pendiente en %

Así la expresión conjunta del factor LS se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$LS = (x/22.1)^m (0.065 + 0.045s + 0.0065s^2)$$

f) Factor de Cobertura (C)

La cobertura vegetal es el elemento natural de protección del suelo contra la fuerza erosiva de la lluvia, disminuyendo la energía de las gotas de lluvia y favoreciendo la infiltración.

Según Kirkby y Morgan (1984), el factor de manejo de los cultivos representa la relación de pérdida del suelo a partir de una condición específica del cultivo o cobertura con la pérdida de suelo a partir de un estado de labranza y barbecho continuo para el mismo suelo, pendiente y precipitación.

Este factor debe incluir los efectos interrelacionados de la cubierta, rotación de cultivos, duración de la estación de crecimiento, productividad, manejo de los residuos, prácticas de cultivo y la distribución de la lluvia.

La evaluación del factor C es difícil debido a los diversos sistemas de cultivo y manejo que existen, así, un terreno cubierto con pastizales densos, bosques o cultivos permanentes que ofrecen una cobertura total al suelo, no presentan señales de erosión. Si la pendiente es fuerte puede haber escorrentía, pero el arrastre de suelo es casi nulo, porque éste es retenido por las raíces de las plantas y sobre todo porque la energía cinética de las gotas de lluvia es disminuido por la vegetación.

González del Tánago (1991), señala que teniendo en cuenta que la EUPS solo se refiere a los procesos de erosión superficial, se debe resaltar la importancia de la protección que ofrecen la hojarasca, restos vegetales, vegetación herbácea y plantas de poca altura que la ofrecida por las copas de los árboles, pues se considera que su efecto es prácticamente nulo cuando su altura supera los 10m.

Para la estimación del factor C, Wischmeier (1974 y 1978), citado por Kirkby y Morgan (1984), presentó tablas con los valores para estimar el efecto del tipo de cultivo y del manejo. González del Tánago (1991) y Kirkby y Morgan (1984), presentan también una serie de tablas para estimar el factor C para diferentes tipos de cobertura.

g) Factor de Prácticas de Conservación (P)

Por definición el factor P en la EUPS, es la relación que hay entre las pérdidas que ocurren en un suelo bajo una determinada práctica de conservación y las pérdidas de suelo que ocurren en el mismo sitio sin prácticas de conservación (Arana, 1992).

Según González del Tánago (1991), el factor P representa la influencia que tienen las prácticas de conservación de suelos sobre las tasa de erosión de una parcela, realizando los trabajos culturales o disponiendo los cultivos en curvas de nivel, en fajas o en terrazas para cortar las líneas de escorrentía.

Wischmeier y Smith (1978), citados por González del Tánago (1991), presentan diferentes cuadros para estimar los valores del factor P, según las prácticas de conservación seleccionadas.

3.3.5 Aplicación de la Metodología

Para efecto de priorizar, la cuenca se dividió en tres zonas, la definición de los límites de las zonas se hizo considerando criterios hidrológicos, geomorfológicos y de uso de la tierra; así, la cuenca se dividió en: cuenca alta, media y baja.

La cuenca alta (zona 1), comprende desde la curva de nivel 2,540 msnm, hasta el límite superior de los cerros Retes, Sapper y Cabeza de Vaca. Esta área corresponde más o menos al paisaje 1 (Figura 14).

La cuenca media (zona 2), corresponde al área comprendida entre los 1,840 msnm hasta los 2,540 msnm, en esta área quedan localizadas las fincas Pavas y Prusia, la estación experimental del MAG, parte del proyecto de Riegos y las comunidades de Ortiga, Azahar, Parte de Llano Grande, Rodeo y Tierra Blanca. Esta zona corresponde al paisaje 2 y parte del paisaje 3.

La cuenca baja (zona 3), comprende desde el puente Bailey hasta los 1,840 msnm, aquí se ubican la Finca Pinas y las comunidades de Banderilla y misión, además esta parte de la cuenca corresponde al cañón del río Reventado donde se presentan zonas con fuertes pendientes, alta inestabilidad geológica y áreas de derrumbe; corresponde con las características del paisaje 4.

Para el análisis de los parámetros considerados por la metodología del CIDIAT, se usaron los modelos (EUPS, Sheng), presentados en los párrafos anteriores y diversas fuentes de información (mapas, censos estadísticos, fotografías aéreas, entrevistas, reconocimiento de campo, etc.). Para el análisis espacial de la información se uso como unidad mínima de análisis una cuadrícula de 30 *30m.

En el Cuadro 5, se presentan los 34 parámetros propuestos por el CIDIAT y en el Cuadro 6, los parámetros y los modelos o las fuentes de información utilizadas para estimar su valor o su peso relativo dentro de la cuenca; esto permitió elaborar las diferentes capas utilizadas en el análisis espacial para obtener el mapa final de áreas críticas.

Cuadro 5 Parámetros seleccionados por el CIDIAT para
la determinación de áreas críticas

- 1.- Tamaño de la Cuenca
 - 2.- Tipo de drenaje
 - 3.- Erosión leve (laminar)
 - 4.- Erosión moderada (surcos)
 - 5.- Erosión fuerte (cárcavas incipientes)
 - 6.- Erosión muy fuerte (sistema de cárcavas)
 - 7.- Presencia de rocas blandas
 - 8.- Relación vertientes áreas planas
 - 9.- Proyectos de conservación ejecutados
 - 10.- Proyectos de fomento agropecuario ejecutados
 - 11.- Daños por inundación
 - 12.- Número de fuentes disponibles de agua
 - 13.- Existencia de obras para control de crecidas
 - 14.- Descarga de aguas servidas
 - 15.- Abastecimiento actual de agua
 - 16.- Abastecimiento futuro de agua
 - 17.- Capacidad productiva actual
 - 18.- Grado de protección al suelo
 - 19.- Contaminación ambiental
 - 20.- Existencia de población campesina en vertientes
 - 21.- Existencia de población campesina en áreas planas
 - 22.- Movimiento migratorio en vertientes
 - 23.- Movimiento migratorio en partes planas
 - 24.- Nivel cultural del usuario en vertientes
 - 25.- Infraestructura establecida
 - 26.- Densidad de población urbana en vertientes
 - 27.- Densidad de población rural en vertientes
 - 28.- Penetración campesina en vertientes
 - 29.- Sobreexplotación de los bosques
 - 30.- Sobreexplotación de los suelos
 - 31.- Quemadas en las vertientes
 - 32.- Quemadas en las partes planas
 - 33.- Precipitación media anual
 - 34.- Intensidad de la precipitación
-

Cuadro 6 Parámetros seleccionados por el CIDIAT para la determinación de áreas críticas y las fuentes de información para aplicar la metodología

1.- Tamaño de la Cuenca	Mapa topográfico
2.- Tipo de drenaje	Mapa topográfico
3.- Erosión leve (laminar)	USLE
4.- Erosión moderada (surcos)	USLE
5.- Erosión fuerte (carcavas incipientes)	USLE
6.- Erosión muy fuerte (sistema de carcavas)	USLE
7.- Presencia de rocas blandas	Mapa geológico
8.- Relación vertientes áreas planas	Mapa de pendientes
9.- Proyectos de conservación ejecutados	Reconocimiento de campo
10.- Proyectos de fomento agropecuario ejecutados	Reconocimiento de campo
11.- Daños por inundación	‡
12.- Número de fuentes disponibles de agua	Entrevistas personales
13.- Existencia de obras para control de crecidas	Reconocimiento de campo
14.- Descarga de aguas servidas	Reconocimiento de campo
15.- Abastecimiento actual de agua	Entrevistas
16.- Abastecimiento futuro de agua	Estadísticas y censos
17.- Capacidad productiva actual	Mapa de uso potencial (Sheng)
18.- Grado de protección al suelo	Mapa de uso actual (Sheng)
19.- Contaminación ambiental	Estudios y evaluaciones en la zona
20.- Existencia de población campesina en vertientes	Estadísticas y censos
21.- Existencia de población campesina en áreas planas	Estadísticas y censos
22.- Movimiento migratorio en vertientes	Estadísticas y censos
23.- Movimiento migratorio en partes planas	Estadísticas y censos
24.- Nivel cultural del usuario en vertientes	Estadísticas y censos
25.- Infraestructura establecida	Reconocimiento de Campo
26.- Densidad de población urbana en vertientes	Estadística y Censo
27.- Densidad de población rural en vertientes	Estadística y Censo
28.- Penetración campesina en vertientes	Estadísticas y censos
29.- Sobreexplotación de los bosques	Mapa de conflicto (Uso Actual vrs. Uso Potencial)
30.- Sobreexplotación de los suelos	Mapa de conflicto (Uso Actual vrs. Uso Potencial)
31.- Quemas en las vertientes	Entrevistas Personales
32.- Quemas en las partes planas	Entrevistas personales
33.- Precipitación media anual	Registros climáticos
34.- Intensidad de la precipitación	Registros climáticos

‡ Efecto fuera de la cuenca

3.3.6 Determinación de Áreas con Riesgo de Derrumbe

Por las características geológicas, de clima y relieve de ésta cuenca, uno de los parámetros que se estudió en este trabajo, fue la determinación de aquellas áreas que presentan un riesgo potencial de derrumbe.

En posición horizontal, las fuerzas ligadas a la sobrecarga hídrica se orientan verticalmente, por lo que no existe posibilidad de movimientos laterales; en cambio, las pendientes de las vertientes, contribuyen a la modificación del equilibrio de la masa del suelo, con la aparición de un componente tangencial resultante de la gravedad, que es proporcional a la sobrecarga hídrica y que se puede medir fácilmente, tomando en cuenta el seno del ángulo de la pendiente.

El estado de equilibrio de la masa o la puesta en movimiento, dependerá del comportamiento mecánico del sistema suelo-agua dentro de umbrales de equilibrio, ligados éstos, a factores físicos internos, como la densidad real y densidad aparente del suelo, que determinan: la porosidad total, la cohesión interna, la textura o las características mineralógicas de las arcillas; o factores externos como la pendiente, sobresaturación hídrica, desarrollo de los sistemas de raíces, corte de los árboles, cambio de especies que conduce a una distribución espacial diferente de las raíces.

Para esta parte del trabajo, se utilizó la metodología propuesta por Collinet (1992); la cual usa los mapas de pendientes, información sobre la profundidad y la porosidad total de los diferentes tipos de suelos que se encuentran en el área de estudio; los datos anteriores permitieron calcular las fuerzas tangenciales, provocadas por la saturación del suelo, para valores de humedad desde 0.66 de la capacidad de campo, que

se alcanza al final de la estación seca, hasta una saturación que llena todos los macroporos del suelo durante la estación lluviosa.

En condiciones de sobresaturación se forma una columna de agua que ejerce una fuerza que es afectada por la gravedad y que es modificada por el seno del ángulo, lo que significa que la fuerza tangencial se va a incrementar a medida que aumenta la pendiente del terreno; la profundidad del suelo es también un factor muy importante a considerar pues mayor será el peso de la columna a mayor profundidad del suelo.

a) **Información Necesaria para Aplicar la Metodología**

para la determinación de los riesgos de derrumbe según el modelo propuesto, se usó la información siguiente:

- 1.- Un mapa que contiene los diferentes paisajes que predominan en la cuenca y que señala los puntos o sitios de muestreo de los suelos.
- 2.- Se calculó la porosidad total para todos los suelos muestreados, a partir de la determinación en el laboratorio de la densidad aparente (DA) y la densidad real (DR).
- 3.- Se determinó en el laboratorio la humedad retenida a una presión de 0.33 bares y a 15 bares, para calcular la columna de agua de sobresaturación.
- 4.- Se determino la profundidad de los suelos a partir de las giras de campo, calicatas construidas, revisiones bibliográficas; determinándose que los suelos de la cuenca son muy profundos, considerando para fines del cálculo de la columna de agua, una profundidad uniforme de 150 cm.

- 5.- Se usó el modelo de elevación digital de la cuenca, para elaborar el mapa de pendientes en grados y calcular el seno del ángulo.
- 6.- Se calculó la sobrecarga hídrica (Newton) y se hace la presentación de un mapa que indica la distribución espacial de los riesgos, agrupandolos en 4 categorías de riesgos (Figura 15).

b) Procesamiento de la Información

El análisis espacial de esta información se realizó mediante un sistema de información geográfica (IDRISI), utilizando los comandos adecuados de este programa, se obtuvo un mapa final que agrupa los diversos riesgos de erosión y presenta estos riesgos en 4 categorías.

IV RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 El Modelo de Elevación Digital (MED) de la Cuenca del Reventado

El modelo de elevación digital (MED), se elaboró siguiendo los pasos indicados en la metodología. Como resultado de la interpolación se obtuvo un archivo que contiene la elevación de cada pixel que permite observar el aspecto del modelo.

Este modelo tiene buena correspondencia con el mapa topográfico de la zona y puede ser utilizado para el análisis de pendientes (en grados y porcentajes). La presentación del mapa en tercera dimensión, se utilizó para la caracterización y delimitación de los diferentes paisajes geomorfológicos que se encuentran en la zona de estudio (Figura 14).

Además, se pueden acentuar ciertas características del relieve, modificando la orientación horizontal y vertical del modelo, que permite resaltar la red hidrográfica, el aspecto, las pendientes prevalectas, cañones de los ríos y las unidades de relieve que constituyen la geomorfología de la cuenca; las unidades geomorfológicas delimitadas en el modelo de elevación digital fueron verificadas en el campo, comprobándose la validez del modelo al observar la correspondencia entre los puntos señalados en el mapa y su ubicación en el campo.

Mediante el filtrado de los mapas de pendientes construido con el modulo SURFACE, se logra obtener una mayor suavidad en las líneas que delimitan las unidades de pendientes y pueden llegar a ser muy parecidos con los mapas elaborados por las metodologías tradicionales (círculo, triángulo).

Además, los mapas de pendientes realizados con el MED son muy precisos, debido que la pendiente es calculada para cada pixel, considerando las diferencias de elevación de este, con respecto a todos los adyacentes y calculando su promedio, esta determinación no depende de una estimación visual de la distancia o separación entre cada curva, como en los métodos tradicionales sino que de un cálculo matemático.

Es importante señalar que la exactitud y utilidad del modelo de elevación elaborado con el programa IDRISI, depende de la escala del mapa topográfico utilizado, del algoritmo de interpolación, de la adecuada digitalización como también de la precisión (RMS) considerada, cuando se realiza la digitalización; para los objetivos de este trabajo se consideró 7.5m, como el valor de RMS máximo aceptado, para los mapas a escala 1:50,000.

4.2 Uso Actual de la Tierra en la Cuenca del Reventado

El Cuadro 7 y la Figura 3 presentan las clases de uso y el porcentaje del área cubierta y su distribución espacial respectivamente en la cuenca del Reventado. Es importante señalar, como una de las ventajas de la utilización de los SIG, la facilidad con que se calcularon las áreas correspondientes a las diferentes categorías de uso, mediante el comando AREA del programa IDRISI.

En los datos presentados en el Cuadro 7, Puede observarse que el bosque y charral son el uso predominante, pues cubren 1102.77 ha que corresponden a un 51.23% del área total, contribuyendo en gran medida la zona alta de la cuenca que forma parte del parque nacional Prusia; además contribuyen también a esta clase, las áreas adyacentes a los cauces de los ríos, los bosques secundarios y los charrales propiamente dichos.

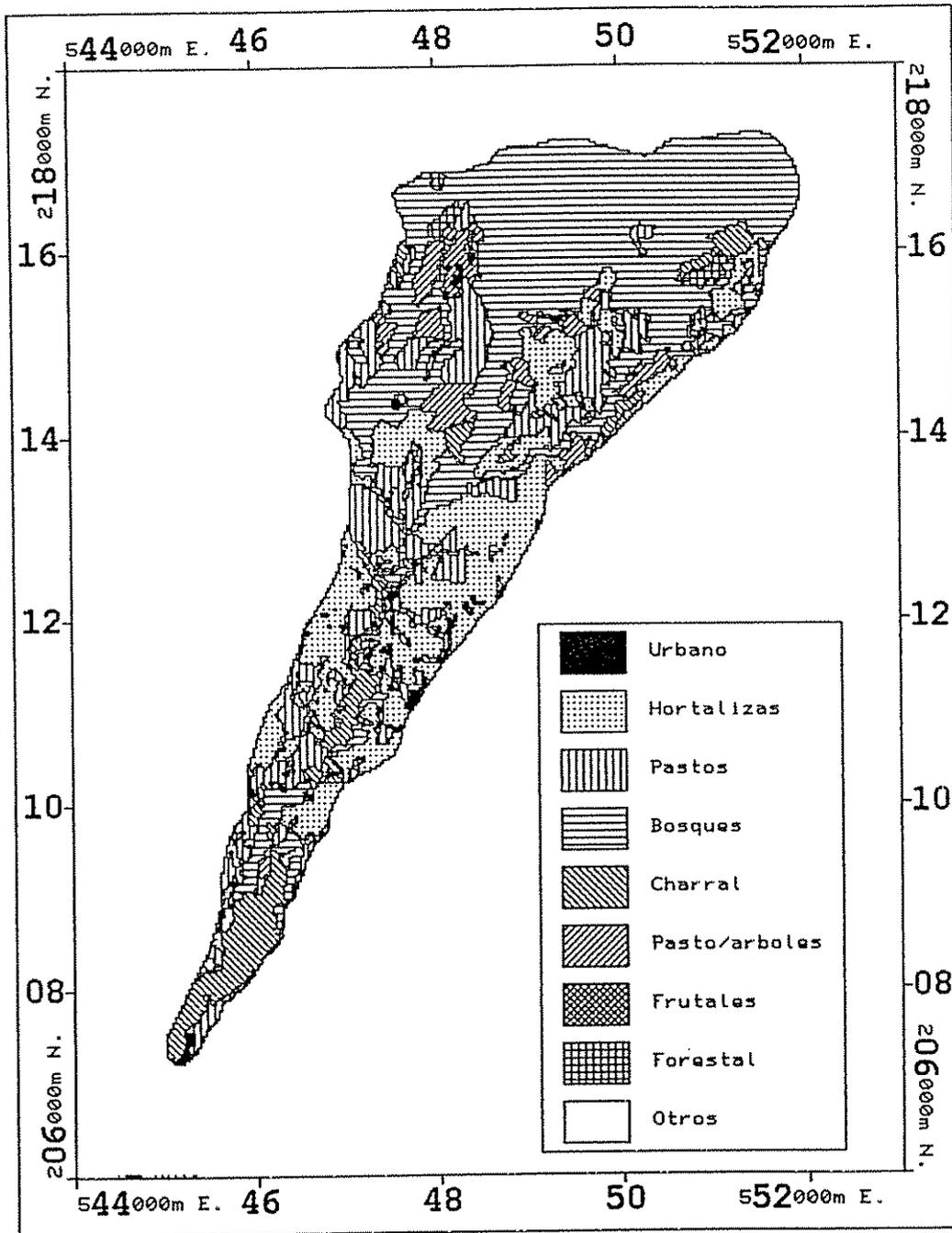


FIGURA 3: USO DE LA TIERRA 1993

A BASE DE FOTOS DE 1989, CONTROL DE CAMPO 1993

1:75 000 Scale



PCI

Las tierras dedicadas al cultivo de hortalizas cubren el 23.11% y se encuentran ubicadas, el mayor porcentaje, en la parte media de la cuenca; los pastos utilizan el 18.28%, la agroforestería el 6.12% y el área urbana que ocupa alrededor del 1% de la cuenca.

El mapa de uso de la tierra fue elaborado a partir de los mapas del proyecto JICA-IGN (1991), escala 1:10,000 y las fotografías aéreas (1989), escala 1:20,000; para la validación de este mapa se hizo un trabajo de comprobación y actualización en el campo. Se elaboró un mapa de uso de la tierra que contenía 9 clases (Figura 3); pero fue necesario agruparlos en 6 clases para la determinación de la capacidad de uso de la tierra (Figura 4).

El bosque y el charral fueron agrupados en una sola clase y las categorías de pastos con árboles, frutales y plantación forestal pasaron a formar otra clase que se denominó cultivos perennes.

Cuadro 7 Uso de la tierra en la cuenca del río Reventado.
Área y porcentaje por clase de uso (1993).

Uso de la Tierra	Área (ha)	(%)
Urbano	18.81	0.87
Hortalizas	497.43	23.11
Pasto	393.48	18.28
Bosque	909.72	42.27
Charral	193.05	8.97
Pasto-Arboles	113.13	5.26
Frutales	1.35	0.07
Plantación Forestal	17.28	0.80
Otros (Tajos, Derrumbes)	8.01	0.37

Fuente: Mapa de uso de la tierra IDRISI. Elaborado a partir de fotos aéreas (89) y mapas de uso proyecto JICA-IGN 1990.

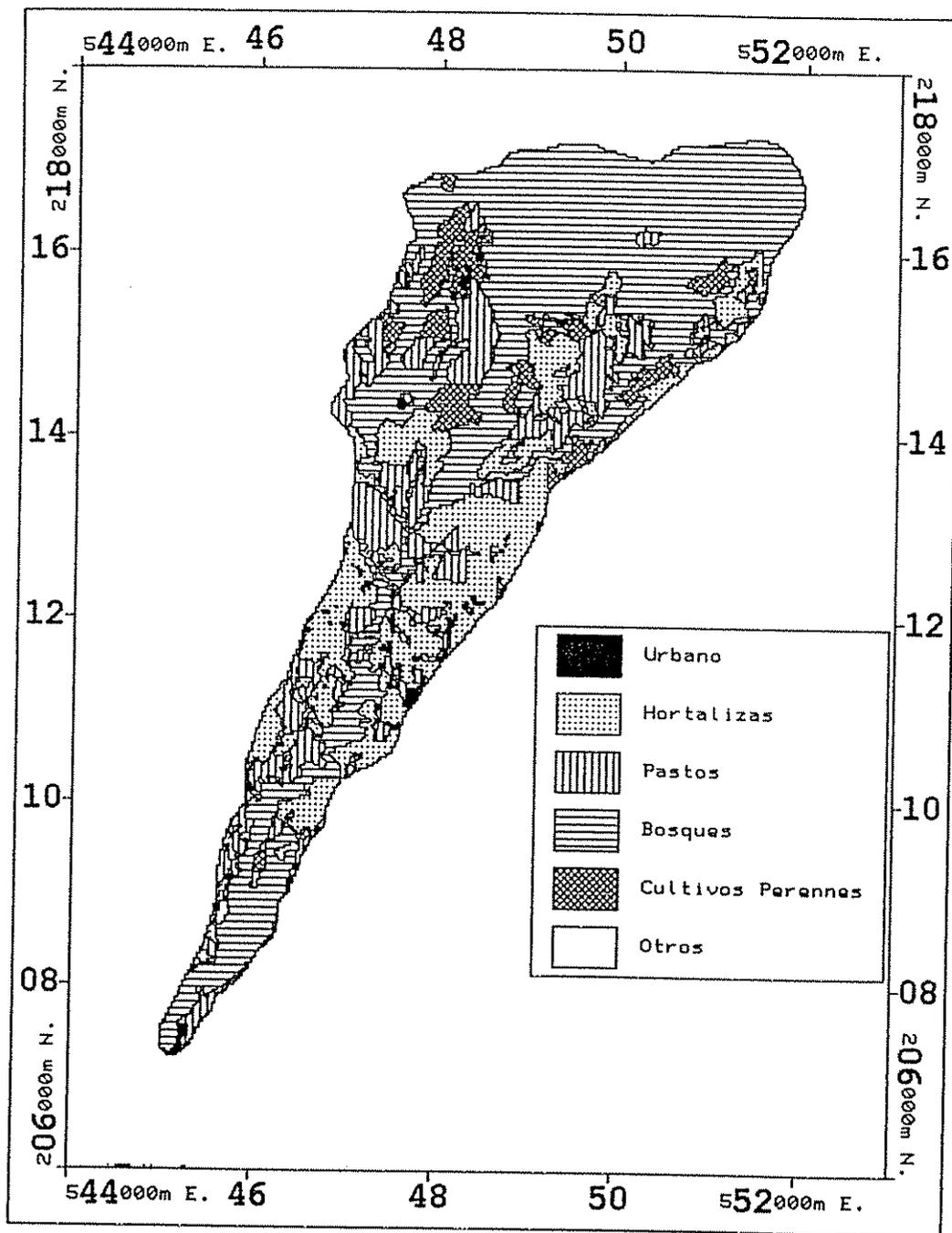


FIGURA 4: USO DE LA TIERRA 1993 (AGRUPADO)

A BASE DE FOTOS DE 1989, CONTROL DE CAMPO 1993

1:75 000 Scale

Kilometers 1 0 1 2 3 4

La elaboración de este mapa fue una de las actividades en las que se invirtió la mayor parte del tiempo en este trabajo; la utilización de las imágenes satélite, podría significar un aporte valioso en esta etapa del proyecto; para esto se debe tener en cuenta el tamaño y accesibilidad de la cuenca.

El análisis de las imágenes podría disminuir los costos y el tiempo de la evaluación, ya que permiten clasificar las zonas en la cuenca de difícil acceso. Esta ventaja es aún mayor si el trabajo de clasificación se realiza para cuencas de gran tamaño.

4.3 Mapa del Uso Potencial de la Tierra

El mapa de uso potencial de la tierra se elaboró a partir de los mapas de pendientes y profundidad de los suelos, siguiendo la metodología de Sheng (1990).

En esta cuenca se consideró que los factores de clima, suelos, pedregosidad, erosión etc., no son limitantes para la producción de los cultivos y por lo tanto las clases de uso potencial determinadas, están en función de la pendiente y la profundidad de los suelos como factores determinantes.

El mapa de pendientes fue elaborado a partir del MED de la cuenca, mediante el módulo SURFACE y las categorías de pendientes consideradas fueron las propuestas por Sheng (1990). La Figura 5, presenta la distribución espacial de los diferentes grupos de pendientes que se encuentran en la cuenca.

El Cuadro 8 presenta el área y el porcentaje correspondiente para las diferentes categorías de pendientes consideradas.

Cuadro 8 Categorías de pendientes predominantes en la cuenca (Sheng, 1990), área y Porcentaje (1993).

Categoría	Rango de Pendientes (%)	(°)	Area (ha)	Porcentaje (%)
1	0 - 12	0 - 7	208.80	9.70
2	12 - 27	7 - 15	777.69	36.13
3	27 - 36	15 - 20	391.32	18.18
4	36 - 47	20 - 25	337.68	15.69
5	47 - 58	25 - 30	209.61	9.75
6	> - 58	> - 30	227.16	10.55
			2152.26	100.00

Fuente: Mapa de pendientes (IDRISI)

Puede observarse en este Cuadro que solamente un 9.7% de los suelos de la cuenca tienen una pendiente suave o suavemente ondulada (< 12%); el 70% de los suelos son escarpados y un 20% muy escarpados (> 47%); lo que indica que tienen un relieve muy inclinado, principalmente en la parte alta de la cuenca donde se observan pendientes mayores del 100%.

Estas áreas fuertemente inclinadas son un factor determinante en la pérdida de suelos por erosión, cuando se remueve la cobertura de la tierra para establecer cultivos o bien que la tierra sea utilizada para cualquier otro uso no adecuado.

La profundidad de los suelos se determinó mediante el reconocimiento de campo, la construcción de calicatas y la revisión de trabajos realizados en la cuenca (tesis, proyectos, informes, etc.); estos indican, que los suelos de la cuenca pueden considerarse de profundos a muy profundos (más de 90cm) y, que se han desarrollado a partir de materiales volcánicos (cenizas y tobas).

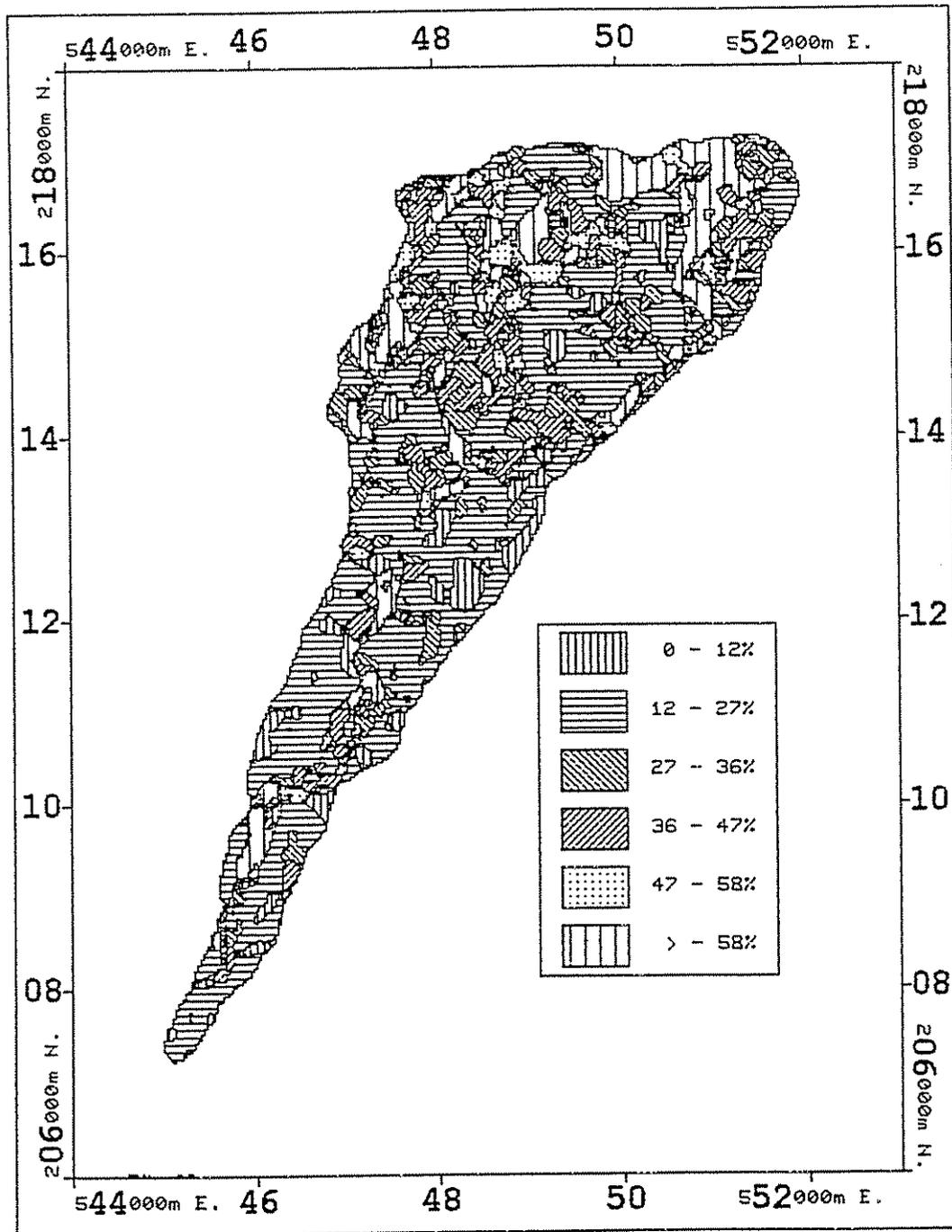


FIGURA 5 : CLASES DE PENDIENTES

CUENCA DEL RIO REVENTADO

1:75 000 Scale

Kilometers 1 0 1 2 3 4

Eventualmente pueden encontrarse en la cuenca suelos superficiales, como en algunos afloramientos rocosos (tobas) y en las laderas de las colinas fuertemente escarpadas, pero estas áreas son pequeñas y no se representaron cartográficamente. En base a la información disponible, se hizo la generalización de considerar todos los suelos de la cuenca como profundos. Por lo tanto el mapa de profundidad de suelos, esta constituido por una lámina con una profundidad uniforme mayor de 90 cm.

La clasificación por "Capacidad de Uso de las Tierras" desarrollada por Sheng, esta orientada al tratamiento de los suelos en las tierras montañosas y cuencas hidrográficas de los trópicos húmedos, este sistema ha sido empleado en Jamaica (Sheng, 1981), Honduras (Sheng modificada, Pérez 1987; Sheng modificada por Michaelsen, Oyuela 1987) y Tailandia (Sheng, 1990).

Esta clasificación considera que si una parcela puede tratarse y protegerse por medio de prácticas adecuadas de conservación de suelos que reducen a un mínimo la erosión, estas parcelas pueden ser utilizada para cultivos intensivos.

A partir de lo anterior, si los suelos son profundos (> 90 cm), las tierras con pendientes hasta de 47% (25°), pueden clasificarse como cultivables; de 47% hasta 58% (30°), como aptas para árboles frutales, cultivos permanentes bajo sombra, cultivos arbóreos y agrosilvicultura y las tierras con pendientes mayores de 58% deben ser utilizadas para reservas forestales, vida silvestre, áreas protectoras y producción de agua.

La Figura 6 presenta el modelo cartográfico utilizado para determinar la capacidad de uso de las tierras.

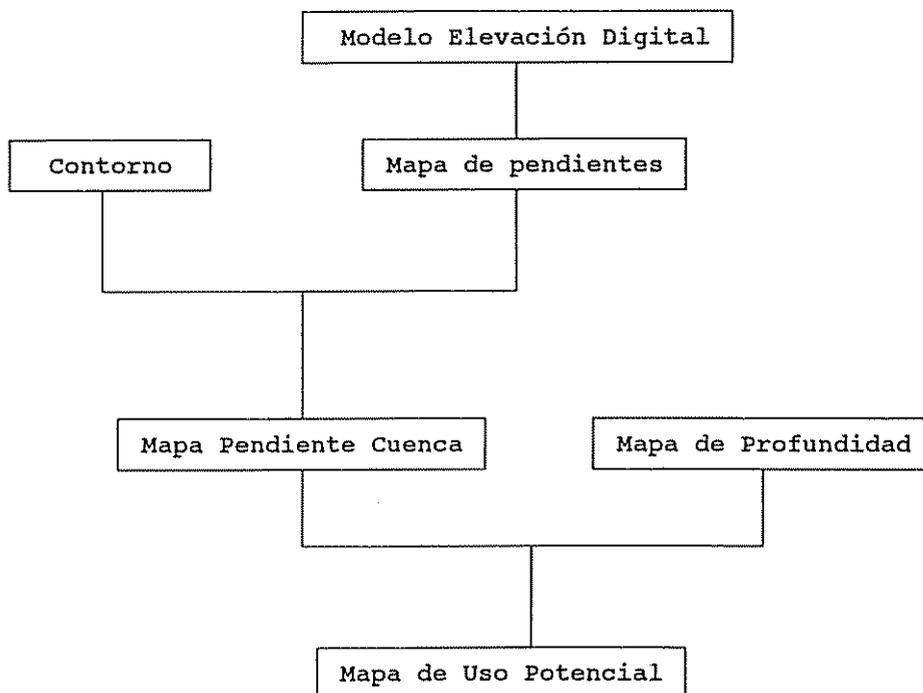


Figura 6 Flujograma del modelo para determinar la capacidad de uso de las tierras (Sheng, 1990).

El Cuadro 9 presenta un resumen de la clasificación de la capacidad de uso en la cuenca del río Reventado y la Figura 7 indica la distribución espacial de las diferentes unidades clasificadas.

Para esto se consideró que los suelos son profundos y que las áreas utilizadas para la producción de cultivos están siendo tratadas con prácticas adecuadas de conservación de suelos de acuerdo a las necesidades del uso más intensivo en función de las pendientes.

Cuadro 9 Clasificación de las tierras por su capacidad de uso (Sheng 19990). Cuenca del Reventado 1993.

Pendiente (°) ¹	Profundidad del suelo ² (cm)	Capacidad de la tierra	Prácticas de Conservación	Uso de la Tierra	Area (ha)
0 - 7	> - 90	C1	Medidas agronómicas terrazas sencillas rotación de cultivos	Todo Cultivo	208.80
7 - 15	> - 90	C2	Todas las anteriores Bancales, cultivos contorno, barreras vivas o muertas	Todo Cultivo	777.90
15 - 20	> - 90	C3	Todas las anteriores	Todo Cultivo	391.32
20 - 25	> - 90	C4	Todas las anteriores con mayor intensidad	Cultivos anuales Perennes	337.68
25 - 30	> - 90	AF	Terrazas para árboles frutales	Cultivos arbóreos	209.61
> - 30	> - 90	F	Cubierta Forestal	Bosque protección	227.16

- 1 El límite de las pendientes de las Tierras cultivables puede cambiar según la situación socioeconómica del país.
- 2 Suelos pedregosos, muy húmedos o muy erosionados se clasifican como pastizal (< 25°) o bosque (> 25°).

Como se observa en el Cuadro 9, 1378 ha (64%) pueden ser utilizadas para la producción de todo tipo de cultivos, 547 ha (25%) tienen potencial para sistemas agroforestales o cultivos arbóreos bajo sombra y 227 ha (11%) deben ser utilizados como bosque natural para la protección de las partes altas de la cuenca.

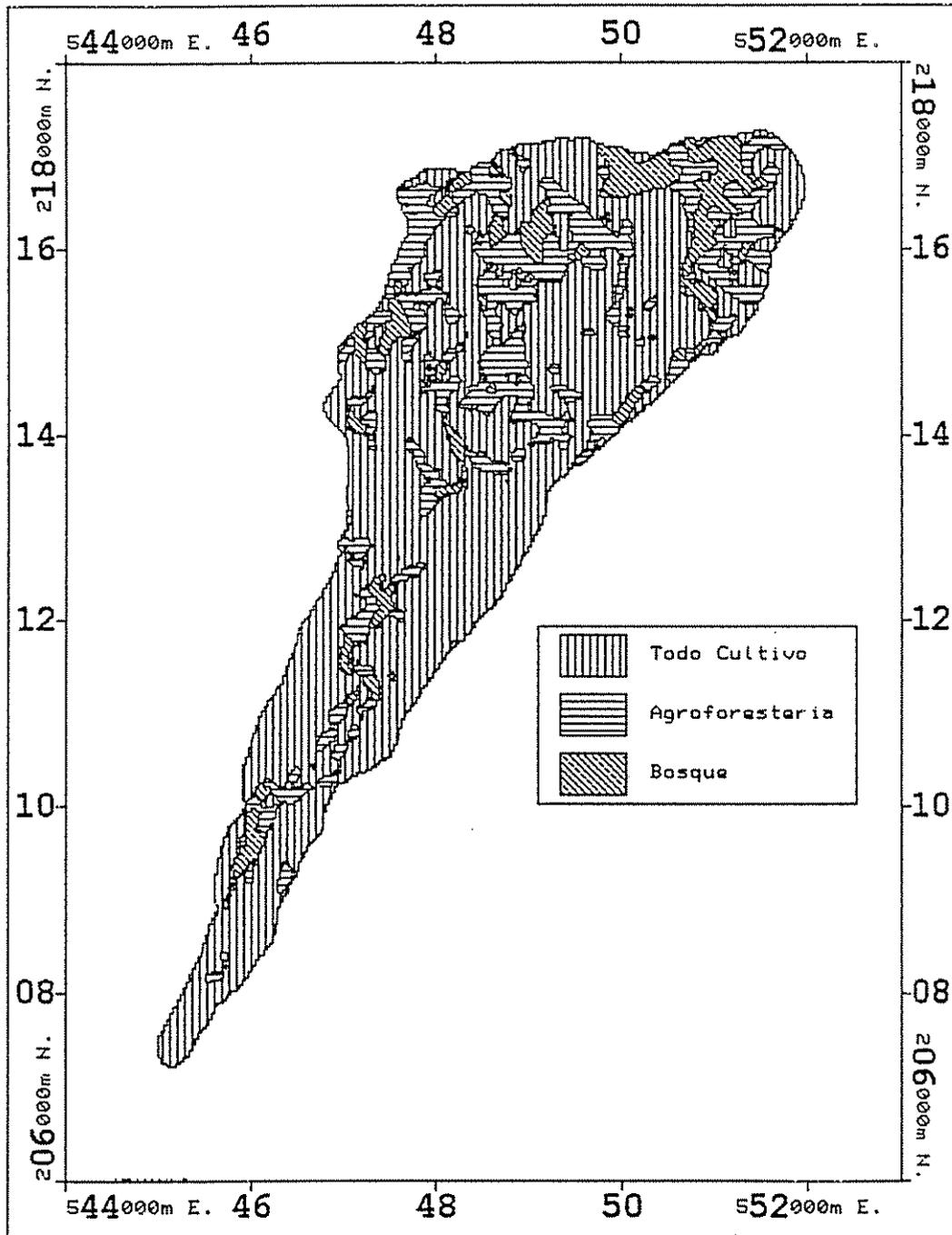


FIGURA 7 : USO POTENCIAL DE LA TIERRA

PCI

CUENCA DEL RIO REVENTADO

1:75 000 Scale

Kilometers 1 0 1 2 3 4

Lo anterior demuestra que el 89% de la cuenca puede ser utilizado para la producción de diversos cultivos (hortalizas, pastos, sistemas agroforestales, frutales, plantación forestal), siempre que se realicen las prácticas adecuadas de conservación de suelos, de acuerdo a las características del cultivo y las condiciones de relieve predominantes.

Uno de los problemas encontrados en la metodología de Sheng, es que no considera el área que corresponde al cauce del río, las planicies de inundación y las partes altas de las cuencas, como una clase de uso distinta (Figura 7); esto lleva a clasificar las partes planas o ligeramente inclinadas, localizadas a las márgenes de los ríos o las zonas de captación de agua, como aptas para todo tipo de cultivo; cuando realmente se deberían clasificar como un tipo de uso especial para la protección del cauce del río. Esto puede resolverse delimitando el área correspondiente a esta clase y no considerarla al hacer el análisis espacial de los parámetros.

Las modificaciones realizadas en los distintos países a esta metodología, están dirigidas principalmente a las prácticas de conservación recomendadas para las diferentes clases de uso de la tierra, las cuales varían según las tradiciones, costumbres y cultura conservacionista del país considerado.

4.4 Uso conflictivo de la Tierra de la Cuenca del Reventado

La sobreposición del mapa de uso potencial con el mapa de uso actual permite elaborar el mapa indicativo de los conflictos del uso de la tierra. Así se determina que las áreas de la cuenca donde el uso actual corresponde con el uso potencial más intensivo permitido, se clasifican como áreas en uso adecuado; las zonas donde el uso de la tierra corresponde

a una intensidad menor que su capacidad de uso más intensiva, se clasifican como áreas en subuso y aquellas donde el uso actual corresponde a una intensidad mayor que el uso máximo permitido, se consideran como áreas en sobreuso.

Desde la perspectiva de la conservación y la degradación de los suelos, las áreas consideradas en sobreuso deben ser señaladas como críticas y se deben realizar acciones orientadas a mejorar las prácticas de manejo de los cultivos, implementar prácticas de conservación de suelos, construcción de obras para la rehabilitación de aquellas zonas más degradadas y cuando el caso lo amerite, se debe realizar un cambio en el uso de la tierra a un uso menos intensivo.

Las áreas señaladas como zonas en subuso, pueden ser reclasificadas, como zonas en uso sostenible, ya que la intensidad del uso actual es menor que su uso potencial y esto puede garantizar un uso del recurso sin degradarse.

Lo mismo puede ocurrir con aquellas áreas que se consideran en uso adecuado, pueden también reclasificarse como zonas en uso sostenible, ya que su uso actual también puede garantizar un uso del recurso sin degradación. De manera que podemos agrupar los suelos en dos categorías: 1.- áreas con uso sostenible (uso adecuado y subuso) y 2.- Areas con uso no sostenible (sobreuso). En este caso el enfoque de la sostenibilidad se hace solamente con respecto al recurso suelo.

El Cuadro 10 y la Figura 8 presentan el área, el porcentaje que ocupan en la cuenca y la distribución espacial de las unidades cartográficas de uso conflictivo.

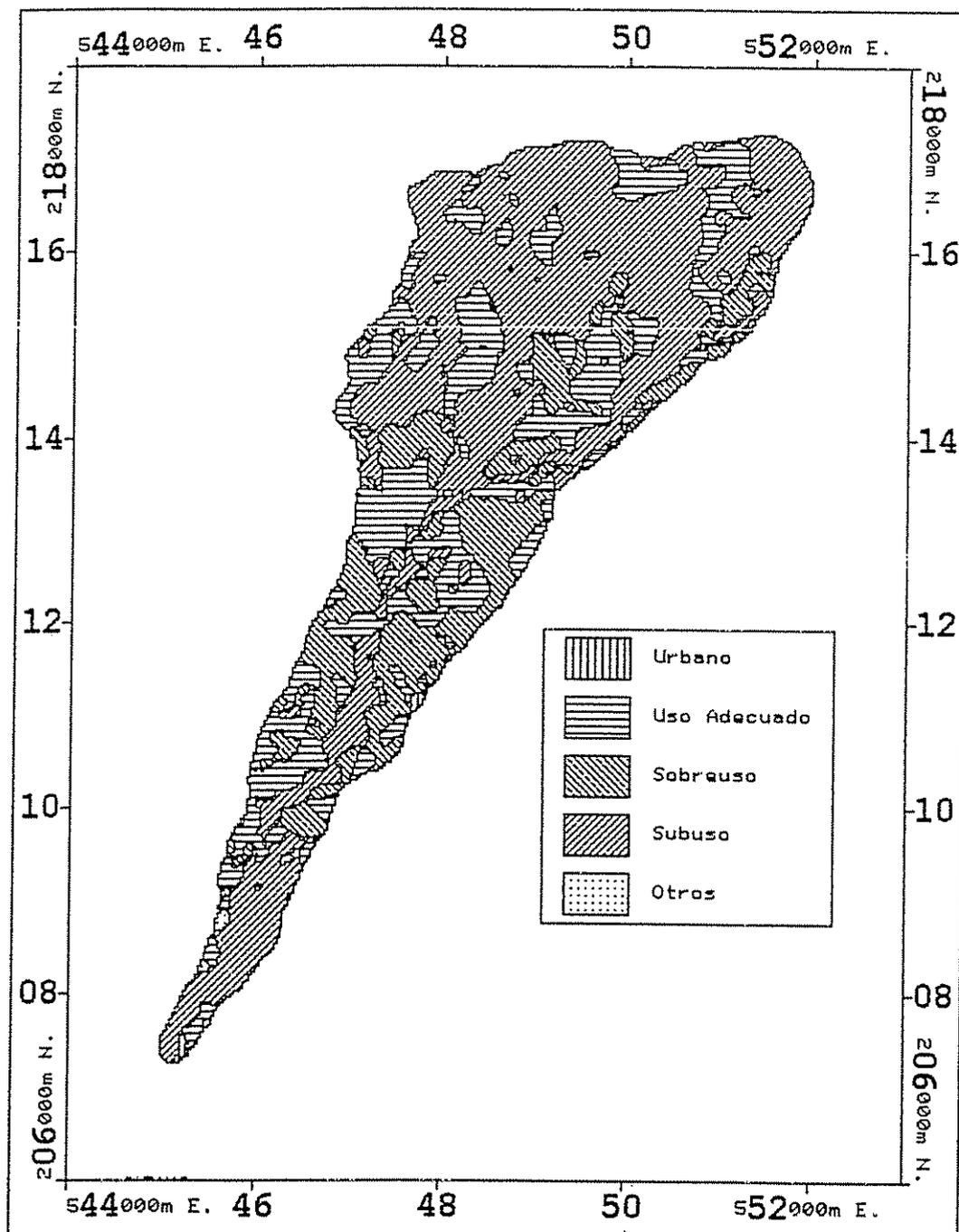


FIGURA 8 : USO CONFLICTIVO

PCI

CUENCA DEL RIO REVENTADO

1:75 000 Scale

Kilometers 1 0 1 2 3 4

Cuadro 10 Uso conflictivo en la cuenca del Reventado.
Categoría, área y porcentaje (1993).

Categoría	Area (ha)	Porcentaje (%)
Adecuado	663.03	30.81
Subuso	1028.97	47.81
Sobreuso	433.44	20.13
Otros	26.82	1.25

Puede observarse en el Cuadro 10, que el 20.13% de las tierras, están sometidas a una intensidad de uso por encima de su capacidad potencial, lo que indica que estos suelos están siendo degradados y que su uso no es sostenible. Para corregir esta situación es necesario caracterizar las zonas y elaborar un plan de rehabilitación de acuerdo a las características específicas prevalecientes en la zona.

El 30.81% de la cuenca esta siendo utilizada adecuadamente y el 47.81% esta en subuso lo que significa que todavía estos suelos pueden ser sometidos a un uso más intensivo sin riesgo de degradación, podemos decir que en esta cuenca el 78.62% esta en un uso sostenible.

Esto último se debe manejar con mucho cuidado, ya que no siempre se debe pensar en cambiar a un uso más intensivo, porque deben considerarse los efectos que un cambio pueden provocar en la cuenca, o bien porque el uso actual, es el uso prioritario ya sea porque esta cuenca es productora de agua, tiene importancia turística o es importante mantener su estado actual para la conservación de la biodiversidad.

Podemos indicar que el mapa de uso conflictivo, tiene una buena correspondencia con la situación encontrada en el campo, pues las áreas que se encuentran en sobreuso, corresponden con la mayoría de las parcelas utilizadas para el cultivo de

hortalizas ubicadas en pendientes fuertes sin prácticas de conservación de suelos, lo cual señala que el modelo de Sheng para determinar el uso potencial de esta cuenca es adecuado.

4.5. Los Factores de la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelos

4.5.1. Cálculo del Factor de Erosividad de la Lluvia (R)

Para el cálculo del factor R, no se utilizó la metodología original propuesta sino que se utilizaron los valores del factor R calculados por Vahrson (1991), en su investigación sobre los aspectos climáticos de la erosión hídrica en Costa Rica; los cálculos se realizaron utilizando la fórmula siguiente (Woodward 1975):

$$R = 0.00245 * P_{2,6}^{2.17} \quad (100 \text{ pies ton pulg acre}^{-1})$$

Donde:

R = Erosividad promedio anual de las lluvias (unidades en el Sistema Inglés).

1 unidad = 100 pies ton pulg acre⁻¹

P_{2,6} = Cantidad máxima anual de lluvias con una duración de 6h y un período de retorno de 2 años.

Estos valores fueron convertidos al S I, multiplicando las unidades del sistema inglés por el factor 17.02, siendo las unidades de erosividad MJ.mm ha⁻¹ h⁻¹.

Las estaciones meteorológicas que tienen influencia en la cuenca, fueron ubicadas espacialmente y digitalizadas en la hoja topográfica Istarú, colocándose como identificador el valor del índice de erosividad respectivo.

El mapa de erosividad de la lluvia, Factor R (EUPS); se elaboró utilizando el archivo vectorial que contiene la ubicación y los valores de erosividad de las estaciones meteorológicas, la interpolación fue realizada en un archivo que contiene un cuadrante de tamaño mayor de la cuenca, por medio del modulo INTERPOL; este archivo raster obtenido se multiplico por el contorno, elaborándose de esta manera un mapa que contiene la distribución espacial de la erosividad para todos los pixeles de la cuenca.

EL Cuadro 11 presenta las estaciones meteorológicas de la cuenca, su ubicación geográfica y su respectivo valor de erosividad en el Sistema Inglés y en el Sistema Internacional de Unidades.

Cuadro 11 Estaciones Meteorológicas de la cuenca del Reventado. Índice de erosividad (Vahrson 1990).

Estación Meteorológica	Latitud (DMS)	Longitud (DMS)	Elevación (msnm)	R *	R (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹)
Comandancia Cartago	9º 52'	83º 55'	1440	207	3523
Sanatorio Duran	9º 56'	83º 53'	2337	160	2723
Volcán Irazú	9º 59'	83º 51'	3400	148	2519
Alto Ochomogo	9º 54'	83º 57'	1546	272	4629
Casa Retes	9º 58'	83º 54'	2880	275	4680
Tierra Blanca	9º 55'	83º 54'	2040	182	3098

* Unidades en el Sistema Inglés (100 pies ton pulgada acre).

Los valores de erosividad pluvial de la cuenca, en el Sistema Internacional, van desde 2519 unidades en la estación del Volcán Irazú como mínimo hasta 4680 en la estación Casa Retes como máximo, estos son considerados como valores de baja erosividad; pues según Vahrson (1990), las zonas con valores menores a 5100 unidades SI, presentan un índice de baja erosividad.

4.5.2 Factor de Erodabilidad de los suelos (K)

En el Cuadro 12 se presentan los valores de las variables utilizadas para el cálculo de la erodabilidad de los suelos y que corresponden a los diferentes perfiles analizados en la cuenca.

Los valores presentados en el Cuadro 12 se utilizaron en el nomograma (Figura 2), para el cálculo del Factor K de la EUPS, las unidades obtenidas para estos valores están dadas en el Sistema internacional de unidades.

Cuadro 12 Características de los perfiles de los suelos utilizados para el cálculo del Factor K

Perfil	% de M. O.	% Arena	% limo	% Arcilla	Textura	Estructura *	Permeabilidad
Retes	3.13	62.4	30.4	7.2	F. Aren.	Granular fina	Rápida
Prusia	3.41	62.4	30.4	7.2	F. Aren.	Granular fina	Rápida
Sant. Duran	4.15	60.4	30.8	8.8	F. Aren.	Granular	Rápida
Ortiga	5.56	50.4	32.8	16.8	Franco	Bloque sub fino	Moderada
Rancherita	2.18	44.4	34.8	20.8	Franco	Bloque sub fino	Moderada

* Tomado de Furcal (1992), Caracterización hídrica de los suelos del proyecto Tierra Blanca.

Uno de los parámetros utilizados por este nomograma es el porcentaje de limo y arena muy fina, valor que es difícil de cuantificar debido a que la textura calculada en el laboratorio solamente determina el porcentaje de Arena (0.02 - 2.0mm), limo (0.02 - 0.002mm) y arcilla (< 0.002); por lo que se hizo una estimación de este parámetro.

La permeabilidad de los suelos fue tomada del estudio realizado por Furcal (1992), donde señala en sus conclusiones, que estos suelos son de alta porosidad total, muy profundos y con una velocidad de infiltración muy elevada (inicial promedio de 49.25 cmh⁻¹ y a las cuatro horas presentan una velocidad promedio de 11.07 cmh⁻¹).

En el Cuadro 13 se presentan los valores del factor K obtenidos con los datos anteriores. Estos valores fueron utilizados para la elaboración del mapa de erodabilidad de los suelos, que corresponde a los diferentes paisajes geomorfológicos presentes en la cuenca, el valor calculado del factor K, debe tomarse como una primera aproximación dadas las limitaciones señaladas en los párrafos anteriores.

Cuadro 13 Valores del Factor K para los diferentes perfiles de la cuenca del Reventado

Perfil	Factor K (ton ha h / ha MJ mm)
Retes	0.031
Prusia	0.031
Sant. Duran	0.032
Ortiga	0.036
Rancherita	0.034

Los valores del factor K obtenidos son similares a los presentados por Arana (1992) para suelos Typic vitrandepts (0.0302) y Mollic vitrandepts (0.0322) y a los presentados por Mora (1987) para las localidades Destierro 2 (0.0317) y T- Seis (0.0317).

Con los datos obtenidos podemos observar que existe poca K espacial en la erodabilidad de los suelos debido a que son muy similares por estar originados del mismo material parental.

4.5.3 Factor Longitud de la Pendiente

La evaluación del factor L en la EUPS, es una de las mayores dificultades que presenta la metodología a nivel de cuenca hidrográfica; la propuesta original de Wischmeier, considera la longitud de la pendiente para parcelas

experimentales de 23.13 m, la determinación de este parámetro y su cartografía para áreas grandes a nivel de cuenca hidrográfica todavía no está bien determinado.

Mora (1987), señala que una de las principales fuentes de error al aplicar la EUPS a nivel de cuenca hidrográfica lo constituye la determinación de la longitud de la pendiente, ya que no es posible determinar con exactitud cuál es la longitud de la pendiente en la cual existe arrastre de material erodado ni donde ocurre la deposición de los sedimentos.

La literatura presenta tablas para establecer la solución de la ecuación LS, con límites de hasta 20% de pendiente y una longitud de hasta 122 m (Wischmeier y Smith, 1978); tablas donde se considera el tipo de vegetación y condiciones de consolidación del suelo (González del Tánago, 1991).

Arana (1992), calculó la longitud de la pendiente en función del tamaño de las parcelas de escorrentía y la distancia entre las obras de conservación de suelos en la subcuenca del río Pensativo, Guatemala. Castillo (1992), en la cuenca del río Las Cañas, El Salvador, usó una longitud de pendiente única de 22.13m que corresponde a la longitud de las parcelas de Wischmeier.

Para el cálculo del factor L en este trabajo, se tomó una longitud de pendiente igual a 30m que corresponde al tamaño de la cuadrícula (pixel) utilizada en los diferentes mapas de la cuenca, esto significa que se considera que cada pixel es independiente y que no hay efecto de los pixeles adyacentes sobre el comportamiento del pixel considerado.

El exponente m se calculó usando la ecuación de McCool et al (1989), citado por González del Tánago (1991).

La expresión matemática usada es la siguiente:

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

Donde:

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

l = Proyección horizontal de la longitud de la ladera.

B = Coeficiente que puede evaluarse según la siguiente expresión:

$$B = (\text{Seno } \alpha / 0.0896) / 3(\text{seno } \alpha)^{0.08} + 0.56$$

α = Angulo de la pendiente en grados.

El valor máximo obtenido al aplicar la ecuación fue de 1.25, este valor es cerca a la unidad, debido a que la longitud de pendiente considerada es muy parecido a al valor unitario establecido por Wischmeier.

4.5.5 Factor de pendiente (S)

Para el cálculo del efecto de la pendiente sobre la erosión de los suelos, se utilizó el mapa de pendientes en porcentajes calculado a partir del modelo de elevación digital (MED), estas pendientes se agruparon en los rangos propuestos por Sheng (1990) y se aplicó la ecuación a la marca de clase para calcular el valor correspondiente al factor S.

Cuadro 14 Valores del Factor S calculado para cada rango de pendiente

Rango de pendiente en %	Marca de clase en %	valor del factor S (EUPS)
0 - 12	6	0.5690
12 - 27	19.5	3.4141
27 - 36	31.5	7.9321
36 - 47	41.5	13.1271
47 - 58	52.5	20.3431
> - 58	65.0	30.4525

Los valores calculados para el factor S, tienen un mínimo de 0.5690 y un máximo de 30.4525, podemos observar que es mayor el efecto de la inclinación de las vertientes sobre la erosión de los suelos que el efecto de la longitud de la pendiente, considerando la longitud de la pendiente uniforme y con una longitud igual a 30m; esto corrobora lo expuesto por González del Tánago (1991), que la pendiente tiene mayor influencia en la erosión que la longitud de la ladera.

4.5.6 Factor de Cobertura y Prácticas de Conservación de Suelos (CP)

Para el cálculo del factor C y P de esta cuenca, se utilizó el mapa de uso de la tierra y la información sobre las prácticas de cultivo empleadas por los productores de la zona. El Cuadro 15 presenta los valores del factor C, que corresponden a los diferentes tipos de cobertura de la tierra encontrados en la cuenca y estos fueron obtenidos de tablas desarrolladas por diversos autores.

El factor P, asignado a las prácticas de conservación realizadas en la zona, corresponde a un valor de 1 en toda la cuenca, ya que en ninguno de los lotes y parcelas visitadas ni en las fotografías aéreas analizadas, pudo observarse la utilización de prácticas adecuadas de conservación de suelos; por el contrario se pudo observar que en general no existe una cultura conservacionista en los productores, debido tal vez a que los suelos son muy profundos y los agricultores no perciben todavía, los efectos de la disminución en la productividad debido a la pérdida del suelo por erosión.

Puede observarse en todas las parcelas cultivadas en la cuenca la evidencia de la erosión en forma de surcos, cárcavas y el arrastre y deposición de sedimentos dentro o fuera de los lotes.

Cuadro 15 Valores del Factor C correspondientes a los diferentes usos de la tierra en la cuenca

Uso de la Tierra	Factor C	Fuente
Urbano	---	
Hortalizas	0.42	Roose, Derksen
Pasto	0.007	Cervantes y Varhson, 1991
Bosque	0.0001	Wischmeier y Smith, 1979.
Charral	0.0001	Wischmeier y Smith, 1979.
Agroforestal	0.002	Roose, Sánchez y Palacios

4.5.7. Distribución Espacial de la Erosión en la Cuenca del Reventado

En el Cuadro 16 se presentan los valores de la pérdida de suelos obtenidos con la aplicación de la EUPS, agrupados por rangos y La Figura 9 presenta la distribución espacial de la erosión en la cuenca del río Reventado.

Cuadro 16 Pérdida de suelos cuenca del río Reventado. Valores calculados mediante la EUPS (1993).

Tipo de Erosión	Rango de pérdida * ton ha ⁻¹	Area (ha)	Porcentaje (%)
Leve	0 - 1	1 207.08	56.08
Moderada	1 - 5	239.49	11.13
Fuerte	5 - 10	121.68	5.65
Muy Fuerte	> - 10	584.01	27.13

* Rangos tomados del CIDIAT:

El uso de la EUPS para estimar la pérdida de suelos por erosión laminar, permitió agrupar los parámetros de erosión leve, moderada, fuerte y muy fuerte en un solo mapa de erosión de los suelos facilitando la aplicación de la metodología.

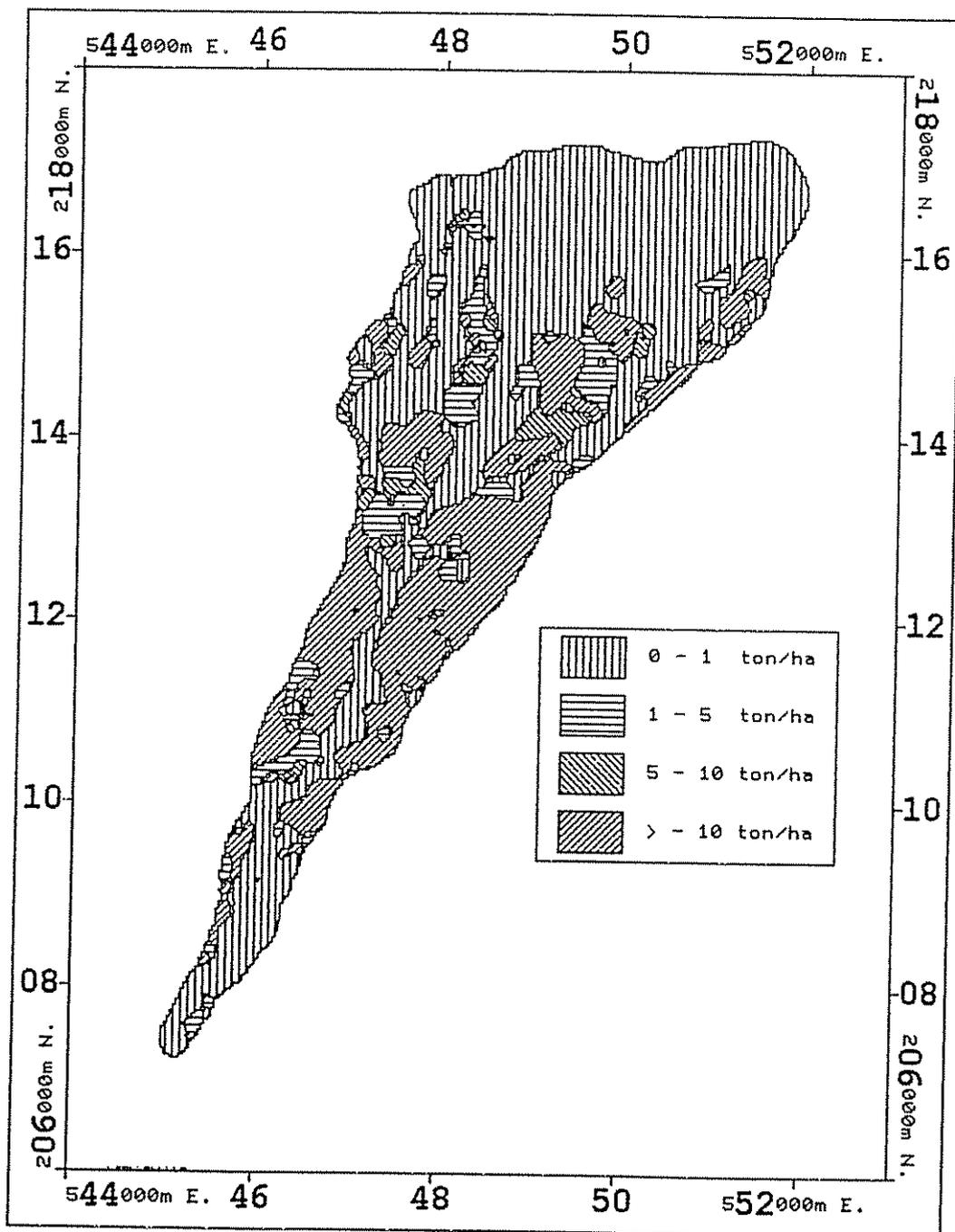


FIGURA 9 : EROSION DE LOS SUELOS

PCI

CUENCA DEL RIO REVENTADO

1:75 000 Scale

Kilometers 1 0 1 2 3 4

Los rangos propuestos por el CIDIAT para definir las diferentes categorías de erosión, se consideran como valores muy bajos, fuera de la realidad de la dinámica de la erosión de los suelos volcánicos bajo cultivo. Ya que una pérdida de $1 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, considerada como erosión leve según la metodología del CIDIAT, en un suelo con una densidad aparente de 1 grcm^{-3} equivale a una lámina de suelo de 0.1 mm de espesor en una ha al año, lo que estaría muy por debajo de las pérdidas que ocurren en los suelos volcánicos, aún con prácticas adecuadas de conservación de suelos.

La EUPS estima solamente las pérdidas de suelo por erosión laminar, lo cual significa que los valores mas altos de erosión que pueden ser debidos a otros factores no son explicados por este modelo. la utilización de un modelo para determinar los riesgos de derrumbes en la cuenca, puede ayudar a mejorar la información utilizada por el CIDIAT, al señalar aquellas áreas donde puede haber un mayor riesgo de derrumbe y una mayor pérdida de suelos.

Debido a los problemas en la determinación de los diferentes parámetros de la EUPS, a nivel de cuenca, especialmente el factor L y K, debemos considerar los valores calculados de la pérdida de suelos, como un índice de riesgo de erosión, más que una determinación cuantitativa, de manera que; donde se estimaron los valores mas altos de pérdida de suelo, existe un mayor riesgo de erosión.

Para validar los resultados obtenidos con la EUPS a nivel de cuenca, se deben correlacionar con valores de pérdida de suelos obtenidos directamente en el campo. Es importante señalar, que la EUPS es, con todas sus limitaciones, el modelo más sencillo y fácil de aplicar en las condiciones de nuestros países, donde es difícil disponer de toda la información que requieren otros modelos.

La figura 10, presenta el flujograma simplificado de la metodología utilizada para el cálculo de la pérdida de suelos por erosión laminar en la cuenca aplicando la Ecuación Universal de la pérdida de suelos.

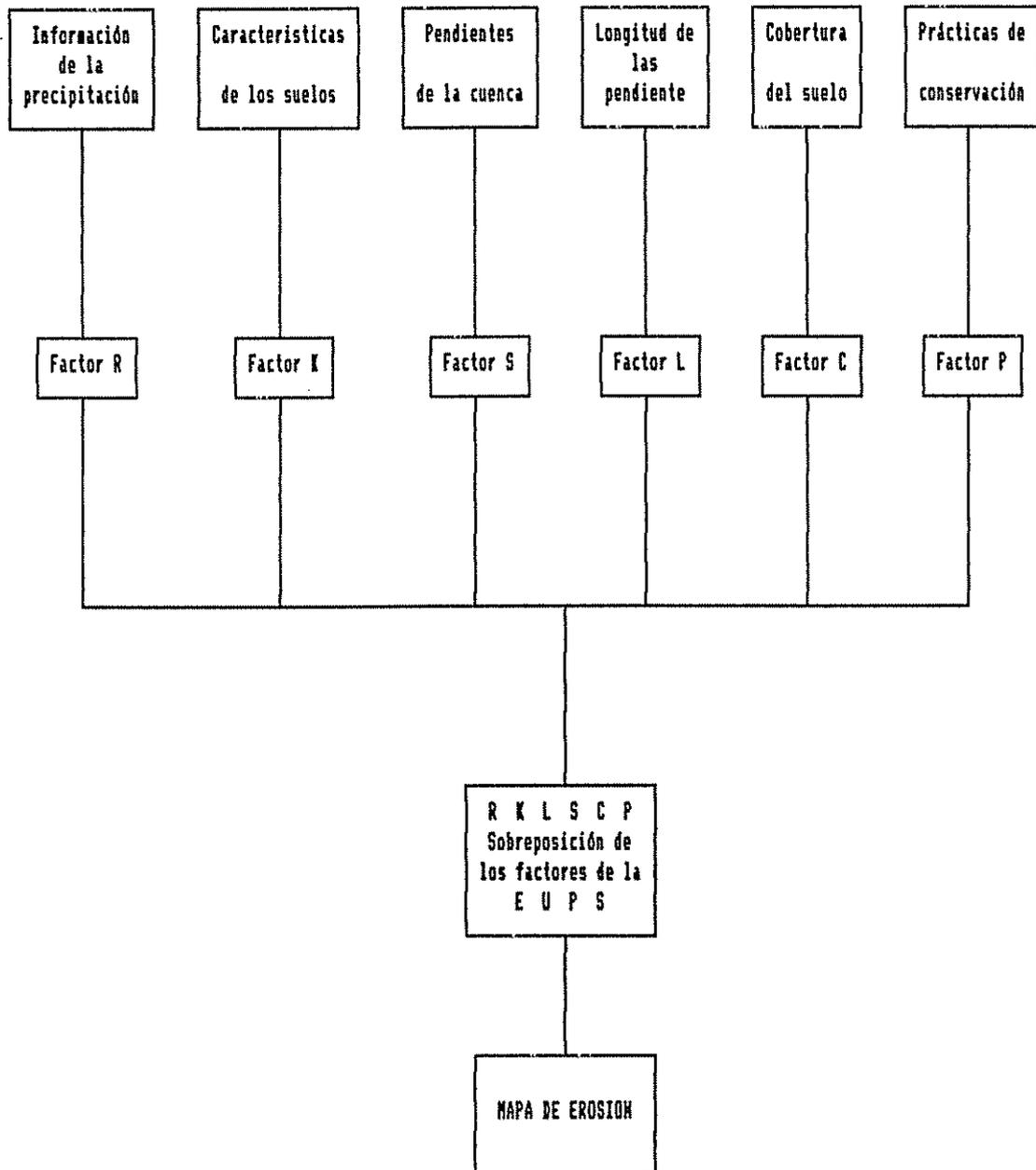


Figura 10 Modelo cartográfico para la aplicación de la E U P S.

4.6 Determinación del Índice Absoluto y el Índice Relativo

Los valores del índice relativo (IR) utilizados en este trabajo, fueron tomados de la metodología original del CIDIAT y para la determinación del índice absoluto (IA) se siguió el procedimiento que se describe a continuación:

- 1- Se elaboró una matriz de doble entrada (Cuadro 17) que contiene los 34 parámetros propuestos por el CIDIAT; esta tabla permite comparar todos los parámetros uno a uno.
- 2- Se asigna un peso al parámetro comparado, en función de la importancia relativa con respecto al parámetro con que se compara según los siguientes criterios:

Valor numérico	Importancia Relativa parámetros
1	Igual Importancia
2	Mayor Importancia
3	Superior Importancia
1/2	Menor Importancia
1/3	Inferior Importancia

- 3.- Se hace una sumatoria de todos los valores asignados a cada parámetro.
- 4.- Se ordenan los parámetros jerárquicamente y al valor más alto obtenido se le asigna un valor de 1 y a los demás se les asigna un peso ponderado con respecto al primero.

Siguiendo los criterios anteriores, se llenaron cuatro matrices por especialistas en diversas áreas de manejo de los recursos naturales; los valores totales obtenidos de cada matriz se sumaron y se obtuvo su promedio (Cuadro 18); con estos valores se hizo la jerarquización y se calculó el índice absoluto correspondiente a cada parámetro.

Los Cuadros 18 y 19, presentan la sumatoria de los valores asignados, la jerarquización de los parámetros y la asignación del Índice absoluto respectivamente.

Cuadro 17
Matriz de los Parámetros seleccionados
por el CIDIAT para la
determinación de áreas críticas

Valores del Índice Absoluto

1	Tamaño de la Cuenca
2	Tipo de drenaje
3	Erosión leve (laminar)
4	Erosión moderada (surcos)
5	Erosión fuerte (carcavas incip)
6	Erosión muy fuerte (sist carcavas)
7	Presencia de rocas blandas
8	Relación vertientes áreas planas
9	Proyectos conservación ejecutados
10	Proyectos fomento agropec. ejec
11	Daños por inundación
12	Fuentes disponibles de agua
13	Obras para control de crecidas
14	Descarga de aguas servidas
15	Abastecimiento actual de agua
16	Abastecimiento futuro de agua
17	Capacidad productiva actual
18	Grado de protección al suelo
19	Contaminación ambiental
20	Población campesina vertientes
21	Población campesina áreas planas
22	Hovimiento migratorio vertientes
23	Hovimiento migratorio partes planas
24	Hivel cultural usuario vertientes
25	Infraestructura establecida
26	Densidad población urbana vertientes
27	Densidad población rural vertientes
28	Penetración campesina vertientes
29	Sobreexplotación de los bosques
30	Sobreexplotación de los suelos
31	Quemas en las vertientes
32	Quemas partes planas
33	Precipitación media anual
34	Intensidad precipitación

1	Tamaño de la Cuenca
2	Tipo de drenaje
3	Erosión leve (laminar)
4	Erosión moderada (surcos)
5	Erosión fuerte (carcavas incip)
6	Erosión muy fuerte (sist carcavas)
7	Presencia de rocas blandas
8	Relación vertientes áreas planas
9	Proyectos conservación ejecutados
10	Proyectos fomento agropec. ejec
11	Daños por inundación
12	Fuentes disponibles de agua
13	Obras para control de crecidas
14	Descarga de aguas servidas
15	Abastecimiento actual de agua
16	Abastecimiento futuro de agua
17	Capacidad productiva actual
18	Grado de protección al suelo
19	Contaminación ambiental
20	Población campesina vertientes
21	Población campesina áreas planas
22	Hovimiento migratorio vertientes
23	Hovimiento migratorio partes planas
24	Hivel cultural usuario vertientes
25	Infraestructura establecida
26	Densidad población urbana vertientes
27	Densidad población rural vertientes
28	Penetración campesina vertientes
29	Sobreexplotación de los bosques
30	Sobreexplotación de los suelos
31	Quemas en las vertientes
32	Quemas partes planas
33	Precipitación media anual
34	Intensidad precipitación

Cuadro 18 Valores del índice absoluto obtenidos de la matriz para priorizar asignados a los 34 parámetros del CIDIAT por 4 especialistas evaluadores, valor promedio obtenido.

Parámetros del CIDIAT	Valores asignados por los especialistas				Promedio
	1	2	3	4	
1.- Tamaño de la Cuenca	20.1	29.0	25.0	26.3	25.1
2.- Tipo de drenaje	26.3	30.5	29.5	20.0	26.2
3.- Erosión leve (laminar)	18.6	40.0	23.9	21.1	25.9
4.- Erosión moderada (surcos)	35.0	57.3	30.6	35.6	39.6
5.- Erosión fuerte (carcavas incipientes)	49.0	68.5	46.3	50.6	53.6
6.- Erosión muy fuerte (sistema de carcavas)	76.0	84.0	76.2	68.8	76.2
7.- Presencia de rocas blandas	21.1	15.6	19.8	22.8	19.8
8.- Relación vertientes áreas planas	44.5	33.6	30.3	34.5	35.7
9.- Proyectos de conservación ejecutados	22.5	33.8	29.5	49.3	33.7
10.- Proyectos de fomento agropecuario ejecutados	20.6	24.9	16.6	37.5	24.9
11.- Daños por inundación	59.0	44.4	57.5	50.2	52.8
12.- Número de fuentes disponibles de agua	29.0	33.7	41.5	30.7	33.7
13.- Existencia de obras para control de crecidas	55.3	29.6	42.0	40.9	41.9
14.- Descarga de aguas servidas	32.6	45.8	55.0	44.5	44.5
15.- Abastecimiento actual de agua	31.6	27.6	33.7	42.0	33.7
16.- Abastecimiento futuro de agua	31.1	19.1	40.3	31.5	30.5
17.- Capacidad productiva actual	49.6	49.7	56.3	43.3	49.7
18.- Grado de protección al suelo	53.5	66.0	56.5	50.0	56.5
19.- Contaminación ambiental	50.1	34.1	53.3	63.0	50.1
20.- Existencia de población campesina en vertientes	37.3	39.6	31.8	34.9	35.9
21.- Existencia de población campesina en áreas planas	33.0	28.3	28.6	28.6	29.6
22.- Movimiento migratorio en vertientes	38.8	31.3	39.0	35.0	36.0
23.- Movimiento migratorio en partes planas	37.6	25.1	33.0	30.6	31.6
24.- Nivel cultural del usuario en vertientes	24.6	33.5	31.3	28.5	29.5
25.- Infraestructura establecida	48.0	37.6	49.0	47.5	45.5
26.- Densidad de población urbana en vertientes	69.0	41.5	41.8	51.4	50.4
27.- Densidad de población rural en vertientes	68.0	39.5	39.3	46.3	48.3
28.- Penetración campesina en vertientes	45.0	39.5	42.0	40.8	41.8
29.- Sobreexplotación de los bosques	80.0	74.0	56.5	67.5	69.5
30.- Sobreexplotación de los suelos	80.0	72.0	49.5	64.5	66.5
31.- Quemadas en las vertientes	39.6	68.5	47.6	49.2	51.2
32.- Quemadas en las partes planas	39.5	53.8	27.6	37.6	39.6
33.- Precipitación media anual	30.1	45.5	29.5	32.4	34.4
34.- Intensidad de la precipitación	65.0	73.0	56.0	62.0	64.0

Cuadro 19 Ordenamiento de los parámetros según su peso y Cálculo del Índice Absoluto.

	Valores asignados por los especialistas				Promedio	Índice A
1.- Erosión muy fuerte (sistema de cárcavas)	76.0	84.0	76.2	68.8	76.2	1.0
2.- Sobreexplotación de los bosques	80.0	74.0	56.5	67.5	69.5	0.91
3.- Sobreexplotación de los suelos	80.0	72.0	49.5	64.5	66.5	0.87
4.- Intensidad de la precipitación	65.0	73.0	56.0	62.0	64.0	0.84
5.- Grado de protección al suelo	53.5	66.0	56.5	50.0	56.5	0.74
6.- Erosión fuerte (cárcavas incipientes)	49.0	68.5	46.3	50.6	53.6	0.70
7.- Daños por inundación	59.0	44.4	57.5	50.2	52.8	0.69
8.- Quemaz en las vertientes	39.6	68.5	47.6	48.2	51.2	0.67
9.- Densidad de población urbana en vertientes	69.0	41.5	41.8	51.4	50.4	0.66
10.- Contaminación ambiental	50.1	34.1	53.3	63.0	50.1	0.66
11.- Capacidad productiva actual	49.6	49.7	56.3	43.3	49.7	0.65
12.- Densidad de población rural en vertientes	68.0	39.5	39.3	46.3	48.3	0.63
13.- Infraestructura establecida	48.0	37.6	49.0	47.5	45.5	0.60
14.- Descarga de aguas servidas	32.6	45.8	55.0	44.5	44.5	0.58
15.- Existencia de obras para control de crecidas	55.3	29.6	42.0	40.9	41.9	0.55
16.- Penetración campesina en vertientes	45.0	39.5	42.0	40.8	41.8	0.55
17.- Erosión Moderada (surcos)	35.0	57.3	30.6	35.6	39.6	0.52
18.- Quemaz en las partes planas	39.5	53.8	27.6	37.6	39.6	0.52
19.- Movimiento migratorio en vertientes	38.8	31.3	39.0	35.0	36.0	0.47
20.- Existencia de población campesina en vertientes	37.3	39.6	31.8	34.9	35.9	0.47
21.- Relación Vertientes áreas planas	44.5	33.6	30.3	34.5	35.7	0.47
22.- Precipitación media anual	30.1	45.5	29.5	32.4	34.4	0.45
23.- Proyectos de conservación ejecutados	22.5	33.8	29.5	49.3	33.8	0.44
24.- Abastecimiento actual de agua	31.6	27.6	33.7	42.0	33.7	0.44
25.- Número de fuentes disponibles de agua	29.0	33.7	41.5	30.7	33.7	0.44
26.- Movimiento migratorio en partes planas	37.6	25.1	33.0	30.6	31.6	0.41
27.- Abastecimiento futuro de agua	31.1	19.1	40.3	31.5	30.5	0.40
28.- Existencia de población campesina en áreas planas	33.0	28.3	28.6	28.6	29.6	0.39
29.- Nivel cultural del usuario en vertientes	24.6	33.5	31.3	28.5	29.5	0.39
30.- Tipo de drenaje	26.3	30.5	29.5	20.0	26.2	0.34
31.- Erosión leve (laminar)	18.6	40.0	23.9	21.1	25.9	0.34
32.- Tamaño de la cuenca	20.1	29.0	25.0	26.3	25.1	0.33
33.- Proyectos de fomento agropecuario ejecutados	20.6	24.9	16.6	37.5	24.9	0.33
34.- Presencia de rocas blandas	21.1	15.6	19.8	22.8	19.8	0.26

4.7 Determinación de las Areas Críticas o Prioritarias

Una vez obtenidos los índices absolutos y relativos para cada parámetro, se procedió a elaborar los diferentes mapas temáticos con la información recopilada para la cuenca, asignándole a cada parámetro el valor correspondiente al producto del IA * IR. En el anexo 1 se presentan los archivos de valores utilizados para asignar los pesos a los diferentes parámetros.

La utilización de la EUPS y el Modelo de Sheng para determinar la capacidad de uso de las tierras, permitió agrupar la información de algunos parámetros en un solo mapa temático, facilitando la aplicación de la metodología; para los parámetros socioeconómicos se utilizó la información obtenida de las giras de reconocimiento y de los datos de estadística y censos.

Algunos de los parámetros propuestos por la metodología no fueron considerados en el presente estudio, por no encontrar información para su evaluación como son: la descarga de aguas servidas, movimiento migratorio en vertientes y movimiento migratorio en partes planas. El tamaño de la cuenca tampoco se evaluó, porque el proceso de la información se realizó considerando el tamaño del pixel como unidad mínima de análisis.

En el caso de los daños posibles por inundación, en esta cuenca este factor no es considerado, ya que por sus características topográficas, de relieve y disposición de la red de drenaje no existe este riesgo dentro de la cuenca, pero si es un factor que debe ser considerado de mucho peso fuera de ella por el riesgo potencial que significa para la ciudad de Cartago. Con la excepción de los parámetros antes indicados todos los demás fueron evaluados.

Una vez elaborados todos los mapas que contenían la información de los parámetros, se realizó la sobreposición de las capas usando los comandos del programa IDRISI, para realizar este proceso de una manera automática, se hizo un programa contenido en un archivo BAT, siguiendo las instrucciones del manual de referencias técnicas del programa IDRISI V - 4.0, para asignar los pesos a cada mapa y procesar la información para la determinación de las áreas críticas de manera automatizada.

El mapa final obtenido contiene todos los valores de la sumatoria de los pesos asignados para cada parámetro; aquellas áreas en las que se observan los valores mas altos son consideradas como áreas prioritarias o críticas.

La elaboración de un proceso automatizado para el cálculo de las áreas críticas permite la posibilidad de simular diferentes alternativas de propuestas en el manejo de los suelos, cambios en el uso de la tierra, implementación de proyectos, etc. y medir el efecto de estos cambios sobre la distribución espacial de las áreas críticas.

También podemos determinar fácilmente que parámetros en la cuenca son los que están aportando el mayor peso y que influyen para que estas áreas sean consideradas como críticas, se puede también hacer agrupamiento de los parámetros socioeconómicos, climáticos, biofísicos y determinar cual de ellos tiene más peso en la cuenca en estudio.

Los Cuadros 20 y 21, contienen los archivos con los programas para calcular el peso correspondiente a cada parámetro (Peso.bat) y el archivo utilizado para la determinación de las áreas críticas (Calcric.bat).

Cuadro 20 Programa para calcular el peso relativo de cada uno de los parámetros (Peso.bat)

scalar	x	contorno	val2	3	1.36
assign	x	erosión	val3456	val3456	2
scalar	x	contorno	val7	3	2.34
assign	x	zonas	val8	val8	2
assign	x	zonas	val9	val9	2
assign	x	zonas	val-10	val-10	2
scalar	x	contorno	val-12	3	2.2
scalar	x	contorno	val-13	3	4.95
assign	x	zonas	val-15	val-15	2
assign	x	zonas	val-16	val-16	2
assign	x	mapusop	val-17	val-17	2
assign	x	usosuelr	val-18	val-18	2
assign	x	zonas	val-19	val-19	2
assign	x	zonas	val-20	val-20	2
scalar	x	contorno	val-21	3	0.585
scalar	x	contorno	val-24	3	1.95
scalar	x	contorno	val-25	3	3
assign	x	zonas	val-26	val-26	2
assign	x	zonas	val-27	val-27	2
assign	x	zonas	val-28	val-28	2
assign	x	zonas	val-29	val-29	2
assign	x	zonas	val-30	val-30	2
scalar	x	contorno	val-31	3	1.139
scalar	x	contorno	val-32	3	0.884
assign	x	precipit	val-33	val-33	2
scalar	x	contorno	val-34	3	2.52

Cuadro 21 Programa para calcular el mapa de Areas Criticas
(Calcri.bat)

overlay	x	1	val2	val3456	temp1
overlay	x	1	temp1	val7	temp2
overlay	x	1	temp2	val8	temp1
overlay	x	1	temp1	val9	temp2
overlay	x	1	temp2	val-10	temp1
overlay	x	1	temp1	val-12	temp2
overlay	x	1	temp2	val-13	temp1
overlay	x	1	temp1	val-15	temp2
overlay	x	1	temp2	val-16	temp1
overlay	x	1	temp1	val-17	temp2
overlay	x	1	temp2	val-18	temp1
overlay	x	1	temp1	val-19	temp2
overlay	x	1	temp2	val-20	temp1
overlay	x	1	temp1	val-21	temp2
overlay	x	1	temp2	val-24	temp1
overlay	x	1	temp1	val-25	temp2
overlay	x	1	temp2	val-26	temp1
overlay	x	1	temp1	val-27	temp2
overlay	x	1	temp2	val-28	temp1
overlay	x	1	temp1	val-29	temp2
overlay	x	1	temp2	val-30	temp1
overlay	x	1	temp1	val-31	temp2
overlay	x	1	temp2	val-32	temp1
overlay	x	1	temp1	val-33	temp2
overlay	x	1	temp2	val-34	areacri
maint	x	1	1	temp1	
maint	x	1	1	temp2	

Con la base de datos creada para la realización de este trabajo, podemos efectuar diferentes aplicaciones fácilmente, tales como determinar el peso de los parámetros de erosión en las diferentes zonas de la cuenca, la importancia de los factores socioeconómicos, etc.

Podemos señalar en este punto, para responder a la hipótesis planteada en este trabajo, que la metodología del CIDIAT puede ser fácilmente aplicada utilizando un SIG para el análisis espacial de sus parámetros, con la ventaja que la base de datos puede ser actualizada fácil y rápidamente y además, se pueden simular los efectos causados al cambiar el peso de algunos parámetros, esto puede servir para evaluar diversas alternativas de manejo propuestas para el manejo de la cuenca.

El Cuadro 22 y la Figura 11 presentan el área, el porcentaje y la distribución espacial respectivamente de las zonas consideradas como críticas o prioritarias.

Cuadro 22 Área y porcentaje para cada Nivel Crítico en la cuenca del río Reventado

Nivel Crítico	Area (ha)	Porcentaje
Nivel 1	0.00	0.00
Nivel 2	0.00	0.00
Nivel 3	918.18	42.66
Nivel 4	818.10	38.01
Nivel 5	415.98	19.33

El Cuadro 22, presenta el área y el porcentaje correspondiente a los diferentes niveles críticos encontrados en la cuenca; para definir estos niveles, se hizo un agrupamiento de los valores obtenidos en el mapa final de áreas críticas. El rango utilizado fue de 20 unidades, así

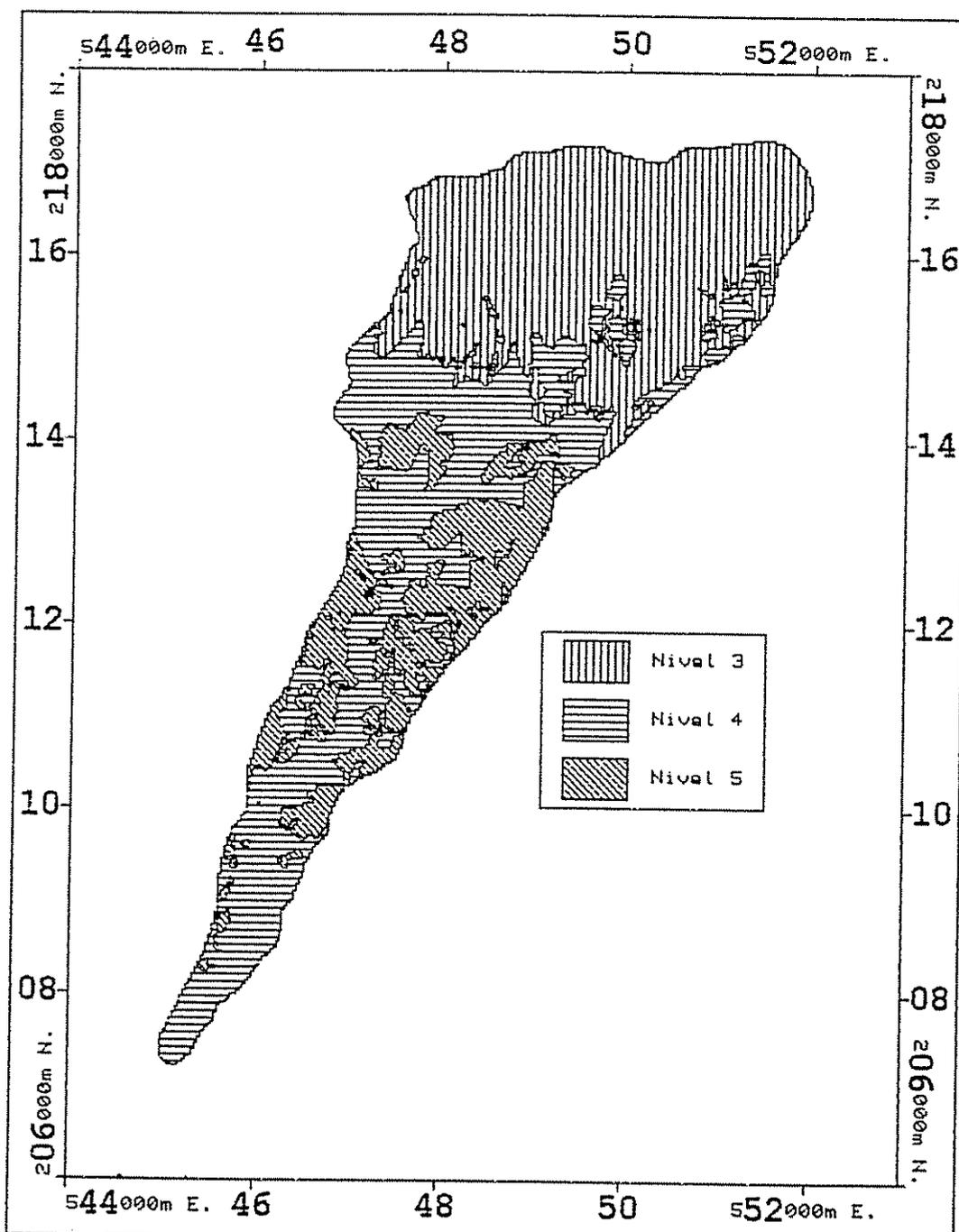


FIGURA 11: AREAS CRITICAS

PCI

CUENCA DEL RIO REVENTADO

1:75 000 Scale

Kilometers 1 0 1 2 3 4

el nivel 1 agrupa todos aquellos pixeles cuyo rango de valores sea de 0 a 20 unidades; el nivel 2 de 20 a 40; el nivel 3 de 40 a 60; el nivel 4 de 60 a 80 y el nivel 5 todos los que tengan un valor por arriba de 80 unidades.

Aunque en esta cuenca no se encontraron valores menores a 40 unidades, en ninguna de las zonas a priorizar, se consideró importante dejar las 5 categorías para efectos de comparación con otras cuencas. Los valores encontrados indican que no existe ningún área que este completamente sin riesgo de degradación, lo cual señala las condiciones de fragilidad de la cuenca. Pues, aunque existen zonas con buena cobertura y protegidas por las leyes (parque Prusia), las características de relieve, clima y tipo de suelos prevalecientes hacen que estos suelos sean susceptibles a derrumbes o degradación si ocurre un cambio inadecuado en el uso de las tierras.

En esta cuenca se encontró que el nivel 3 era el nivel crítico mínimo encontrado para todas las zonas, el 42.66 % de la cuenca tiene un nivel 3, el 38.01 % tiene un nivel 4 y al 19.33 % le corresponde un nivel 5; puede observarse en la Figura 9 que en la parte media de la cuenca se encuentra el mayor porcentaje del nivel crítico 5. Lo anterior indica que la zona media (Figura 12), es la zona prioritaria en esta cuenca, pues es donde los parámetros evaluados tienen el mayor peso.

El Cuadro 23 señala la comparación de la zona alta, media y baja de la cuenca y los porcentajes de los niveles críticos en cada una de ellas y la Figura 12 la distribución espacial de las zonas en la cuenca.

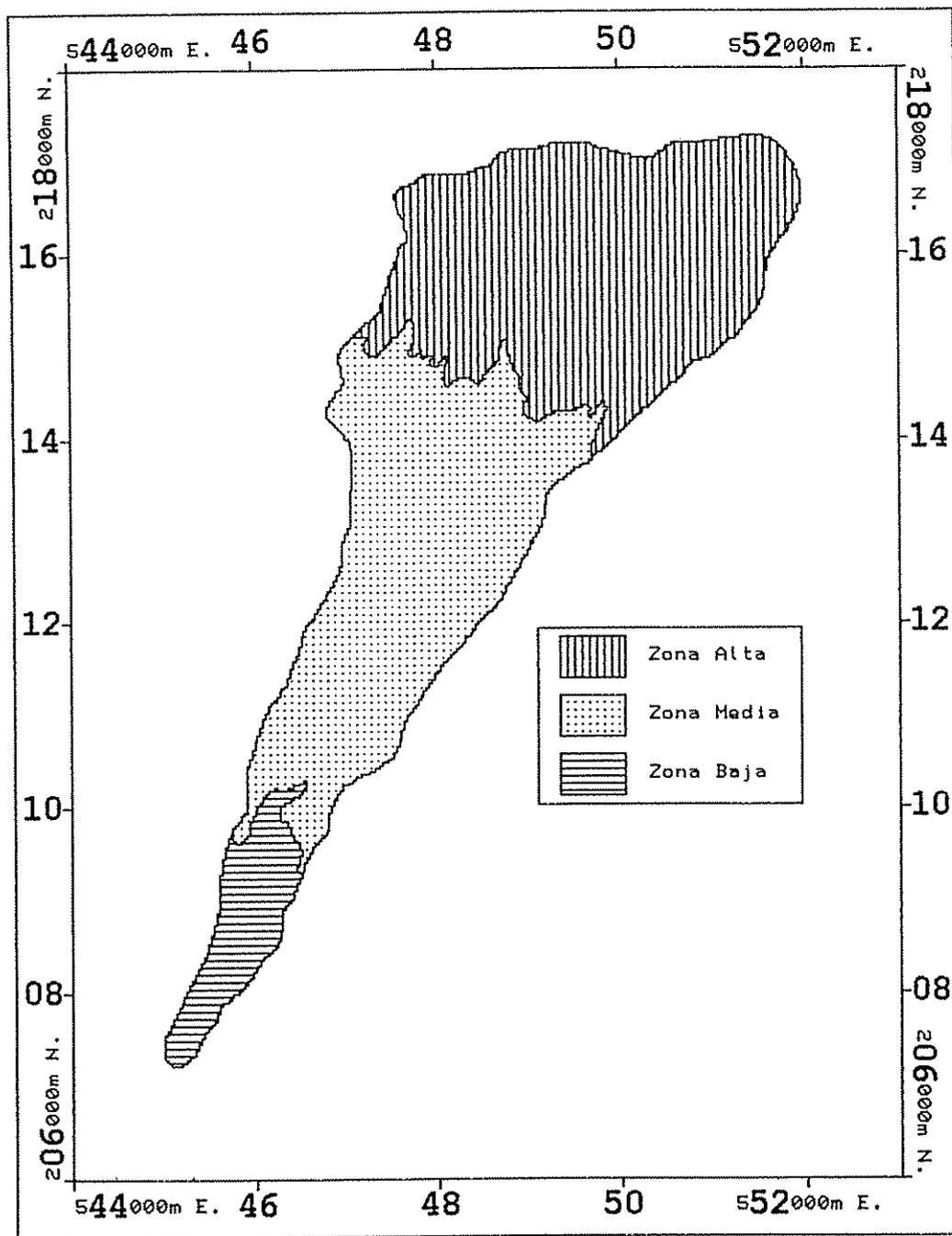


FIGURA 12: ZONAS A PRIORIZAR

PCI

CUENCA DEL RIO REVENTADO

1:75 000 Scale

Kilometers 1 0 1 2 3 4

Cuadro 23 Comparación de los Niveles Críticos entre la zona alta, media y baja de la cuenca

Nivel Crítico	Zona Alta			Zona Media			Zona Baja		
	ha	% A	% R	ha	% A	% R	ha	%A	%R
Nivel3	918.2	42.7	89.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Nivel4	105.3	4.9	10.3	551.1	25.6	57.7	161.7	7.5	93.3
Nivel5	0.0	0.0	0.0	404.3	18.8	42.3	11.7	0.6	6.7
	1023.5		100.0	955.4		100.0	173.4		100.0

% A = % Absoluto, relacionado con el área total de la cuenca

% R = % Relativo relacionado al área de la zona

En el Cuadro 23, se puede observar que la zona alta no tiene ninguna área con un nivel crítico 5, tiene un 10.3 % del nivel 4 y 918.18 ha del nivel 3, que corresponden al 89.7 % del área de la zona alta (42.7 % de toda la cuenca).

Lo anterior indica que esta zona es la que presenta una menor influencia del peso de los parámetros del CIDIAT, esto es debido a que la parte alta de la cuenca es una área declarada como parque nacional y no existe presión sobre los recursos, con la excepción de las áreas que están fuera del parque. La superficie cubierta de bosque en la zona alta, es del 66.5 %; el pasto y pasto con árboles cubren el 19.4 % y las hortalizas utilizan el 8.5 % de los suelos.

La zona media no tiene ningún área con nivel 3, tiene 551.1 ha con nivel 4 que corresponde al 57.7 % de la superficie de la zona (25.6 % de la cuenca) y 404 28 ha con un nivel crítico 5 (42.3 %) de la zona; esto significa que en esta parte de la cuenca es donde tienen mayor incidencia los parámetros del CIDIAT y señalan esta zona como prioritaria o crítica.

En esta zona el 42.2 % de los suelos esta utilizado para el cultivo de hortalizas, el 28.4 % para pastos y el 27.8 % esta cubierto por bosque el charral; también es en esta parte

donde existe mayor presión social sobre los recursos, pues es donde las comunidades establecidas tienen mayor influencia y realizan la mayoría de sus actividades.

En la zona baja, no existe el nivel 3, la mayor parte de los suelos tienen un nivel crítico 4 (161.7 ha) que equivalen al 93.3 % de la cuenca y solamente 11.7 ha (6.7 %) corresponden al nivel 5. El bosque y el charral cubren el 68.0 % de la zona; el 19.9 % es utilizado para pastos y el 4.6 % para hortalizas.

Esta zona por sus características geomorfológicas, de inestabilidad de los suelos y algunas actividades de uso realizadas por empresas constructoras en el lecho del río, hacen que sea una zona crítica, especialmente por el riesgo que representaría para la ciudad de Cartago, si ocurriera un derrumbe, ya que en este sitio podría formarse un dique que al romperse formaría una avalancha de lodo, piedras y detritus que ocasionarían graves daños en Cartago y las comunidades ubicadas en las provincias de inundación del río.

La metodología no identifica esta zona como la más crítica, debido a que sus parámetros están más orientados a identificar las áreas sometidas a riesgo de erosión y degradación por su uso para la producción agrícola; otra razón podría ser la escala utilizada en este trabajo.

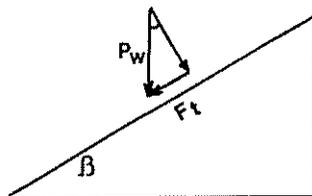
4.8 Determinación del Riesgo de Derrumbes en la Cuenca del Reventado

Para la determinación de las áreas con riesgo potencial de derrumbe, se utilizó el modelo propuesto por Collinet (1992), los suelos de la cuenca del Reventado son de origen volcánico y se caracterizan por su baja densidad aparente y su alta

porosidad, esto significa que pueden almacenar cantidades importantes de agua en la época lluviosa, además, los andisoles tienen una débil cohesión por lo que sus agregados pueden fácilmente separarse.

Los parámetros considerados por el modelo para estimar los riesgos potenciales de derrumbes son: (i) la sobrecarga hídrica provocada por el agua que va a saturar la porosidad total (ii) y la pendiente de los suelos. La metodología se basa en la columna de agua contenida en la porosidad del suelo desde 2/3 de capacidad de campo (CC), hasta la saturación de la porosidad total en la época lluviosa, esta columna ejerce una fuerza, que se orienta verticalmente en posición horizontal y no existen riesgos de movimientos laterales; pero por efecto de la pendiente de las vertientes, se origina una fuerza tangencial (F_t) resultante y que es proporcional a la sobrecarga hídrica, la cual puede medirse considerando el seno del ángulo de inclinación de la pendiente.

Lo anterior puede representarse así:



La ecuación para calcular este efecto esta dada por:

$$F_t = \text{Sen } \beta * P_w$$

donde:

F_t = Fuerza tangencial

β = Angulo de la vertiente

P_w = Peso de la columna de agua

Para la determinación de la columna de agua de sobresaturación, se utilizó la información de los análisis de suelos de los perfiles muestreados. Para cada perfil se determinó el espesor de los diferentes horizontes y su composición volumétrica, considerando la profundidad de los suelos hasta 150 cm.

Los Cuadros siguientes presentan los resultados de los análisis de los perfiles considerados en el estudio.

Cuadro 24 Composición volumétrica del perfil de la finca Retes

Horizontes	1	2	3
Profundidad (cm)	0	25	60
Espesor (cm)	25	35	90
Arc/Lim/Aren (%)	7/30/63	3/13/84	5/33/62
M O (%)	3.13	0.85	3.34
D A (gcm^{-3})	0.9	1.2	0.9
D R (gcm^{-3})	2.66	2.76	2.61
P T (% grav.) *	66.16	56.52	65.51
C C id.	18.89	4.32	21.34
2/3 C C id.	12.59	2.88	14.22
P M id.	6.94	1.56	6.70
P T (%vol mm cm^{-1}) *	6.61	5.65	6.55

Arc = Arcilla

Lim = Limo

Aren = Arena

M O = Materia orgánica

P M = Punto de marchites

D A = Densidad aparente

D R = Densidad real

P T = Porosidad total

C C = Capacidad de campo

La P T (porosidad total) expresada como porcentaje de agua gravimétrica, significa que del 100 % del volumen del suelo, un porcentaje "x" corresponde al espacio poroso, que puede ser ocupado por agua o por aire. Para convertir la P T a un porcentaje volumétrico se debe considerar la lámina de suelo. Así:

$$* P T (\text{mm cm}^{-1}) = P T (\% \text{ grav.}) 100^{-1} * \text{prof}(\text{cm}) * 10 \text{ mm cm}^{-1}$$

Cuadro 25 Composición volumétrica del perfil Prusia

Horizontes	0	1	2	3	150
Profundidad (cm)	0	22	65	150	
Espesor (cm)		22	43	85	
Arc/Lim/Aren (%)		7/30/63	11/28/61	9/35/56	
M. O. (%)		3.41	3.30	3.22	
D A (gcm^{-3})		0.96	1.00	0.93	
D R (gcm^{-3})		2.60	2.60	2.63	
P T (% grav.)		63.07	61.53	64.63	
C.C. id.		22.95	24.40	27.35	
2/3 C.C. id.		15.30	16.26	18.23	
P.M. id.		8.05	9.85	10.02	
P T (%vol mm cm^{-1})		6.30	6.15	6.46	

Cuadro 26 Composición volumétrica perfil Sanatorio Duran

Horizontes	0	1	2	3	150
Profundidad (cm)	0	30	60	150	
Espesor (cm)		30	90		
Arc/Lim/Aren (%)		7/31/60	9/31/60	11/29/60	
M. O. (%)		4.15	2.56	4.84	
D A (gcm^{-3})		1.02	1.20	1.03	
D R (gcm^{-3})		2.60	2.62	2.58	
P T (% grav.)		60.77	54.19	60.07	
C.C. id.		24.56	22.53	28.75	
2/3 C.C. id.		16.37	15.02	19.16	
P.M. id.		9.09	9.29	12.31	
P T (%vol mm cm^{-1})		6.07	5.41	6.01	

Cuadro 27 Composición volumétrica del perfil Ortiga

Horizontes	0	1	2	3	150
Profundidad (cm)	0	22	50	150	
Espesor (cm)		22	100		
Arc/Lim/Aren (%)		17/29/54	13/29/58	17/33/50	
M. O. (%)		5.56	3.60	4.08	
D A (gcm^{-3})		0.88	1.10	0.88	
D R (gcm^{-3})		2.57	2.60	2.53	
P T (% grav.)		65.75	57.69	65.27	
C.C. id.		34.06	28.18	35.51	
2/3 C.C. id.		22.71	18.78	23.67	
P.M. id.		16.35	13.28	18.83	
P T (%vol mm cm^{-1})		6.57	5.76	6.52	

Cuadro 28 Composición volumétrica del perfil La Rancherita

Horizontes	1	2	3
Profundidad (cm)	0 30	30 80	80 150
Espesor (cm)	30	50	70
Arc/Lim/Aren (%)	21/35/44	21/29/50	21/33/46
M. O. (%)	2.18	2.56	3.35
D A (gcm^{-3})	1.04	0.97	0.98
D R (gcm^{-3})	2.63	2.62	2.62
P T (% grav.)	60.45	62.97	62.59
C.C. id.	38.88	36.13	33.94
2/3 C.C. id.	25.92	24.08	22.62
P.M. id.	17.98	18.30	17.51
P T (%vol mm cm^{-1})	6.04	6.29	6.25

Con la información contenida en los Cuadros anteriores se calculó la altura total en mm de la columna de agua, considerando el aporte de cada horizonte de acuerdo a sus características específicas.

En el Cuadro 29 se presenta un resumen de las variables utilizadas para el cálculo de la columna de agua que corresponde a cada perfil y en el Cuadro 30 se presentan los valores en Newton, de la fuerza tangencial ejercida por la sobresaturación hídrica para cada perfil, que señala el riesgo potencial de derrumbe en los diferentes sitios de la cuenca.

Cuadro 29 Cálculo de la columna de agua contenida entre porosidad total y 2/3 CC para una profundidad de 150cm

Perfil Finca Retes

Profundidad (cm)	Espesor (cm)	P T % Grav	2/3 CC % Grav	Vol Sobrecarga % Grav	mm/cm	columna mm
0 - 25	25	66.16	12.59	53.57	5.36	134.00
25 - 60	35	56.52	2.88	53.64	5.36	187.60
60 - 150	90	65.51	14.22	51.29	5.12	460.80
Total						782.40

- - - - - Continúa

- - - - Continuación

Perfil Prusia

Profundidad (cm)	Espesor (cm)	P T % Grav	2/3 CC % Grav	Vol Sobrecarga % Grav	mm/cm	columna mm
0 - 22	22	63.07	15.30	47.77	4.78	105.16
22 - 65	43	61.53	15.26	45.27	4.53	194.79
65 - 150	85	64.63	18.23	46.40	4.64	394.40
Total						694.40

Perfil Sanatorio Duran

Profundidad (cm)	Espesor (cm)	P T % Grav	2/3 CC % Grav	Vol Sobrecarga % Grav	mm/cm	columna mm
0 - 30	30	60.77	16.37	44.40	4.44	132.20
30 - 60	30	54.19	15.02	39.17	3.92	117.60
60 - 150	90	60.07	19.17	40.90	4.09	368.10
Total						618.90

Perfil Ortiga

Profundidad (cm)	Espesor (cm)	P T % Grav	2/3 CC % Grav	Vol Sobrecarga % Grav	mm/cm	columna mm
0 - 22	22	65.75	22.70	43.05	4.31	94.82
22 - 50	28	57.69	18.78	39.91	3.99	111.72
50 - 150	100	65.27	23.67	41.60	4.16	416.00
Total						622.54

Perfil La Rancherita

Profundidad (cm)	Espesor (cm)	P T % Grav	2/3 CC % Grav	Vol Sobrecarga % Grav	mm/cm	columna mm
0 - 30	30	60.45	25.92	34.53	3.45	103.50
30 - 80	50	62.97	24.09	38.88	3.89	194.50
80 - 150	70	62.59	22.63	39.96	4.00	280.00
Total						578.00

Cuadro 30 Fuerza ejercida por la columna de agua en los diferentes perfiles

Perfil	Columna de agua (mm)	kg m ⁻²	Fuerza Newton (kg m ⁻¹ s ⁻²)
Retes	782.40	782.40	7 668
Prusia	694.35	694.35	6 805
Sant. Duran	618.90	618.90	6 065
Ortiga	622.54	622.54	6 101
La Rancherita	578.00	578.00	5 664

Debido a las características de los paisajes predominantes en la cuenca y a la ubicación espacial de los perfiles muestreados, se eligieron los más representativos de las unidades geomorfológicas cartografiadas; el perfil de Prusia (perfil 2) para el paisaje 1, Ortiga (perfil 4) para el paisaje 2 y la Rancherita (perfil 5) para el paisaje 3 (Figura 13 y 14).

Al mapa de las zonas geomorfológicas del Reventado (Figura 14) se le asignaron los valores de la fuerza de sobresaturación y se obtuvo una capa que contiene la fuerza en Newton para cada pixel. A partir del modelo de elevación digital de la cuenca se elaboro el mapa de pendientes en grados, calculando el seno por medio del comando TRANSFORM.

Una vez obtenida la capa que contiene la fuerza de sobrecarga en Newton y la del seno del ángulo, se multiplicaron ambos mapas por medio del comando OVERLAY obteniéndose un mapa final que contiene los valores de los riesgos de derrumbes para cada pixel.

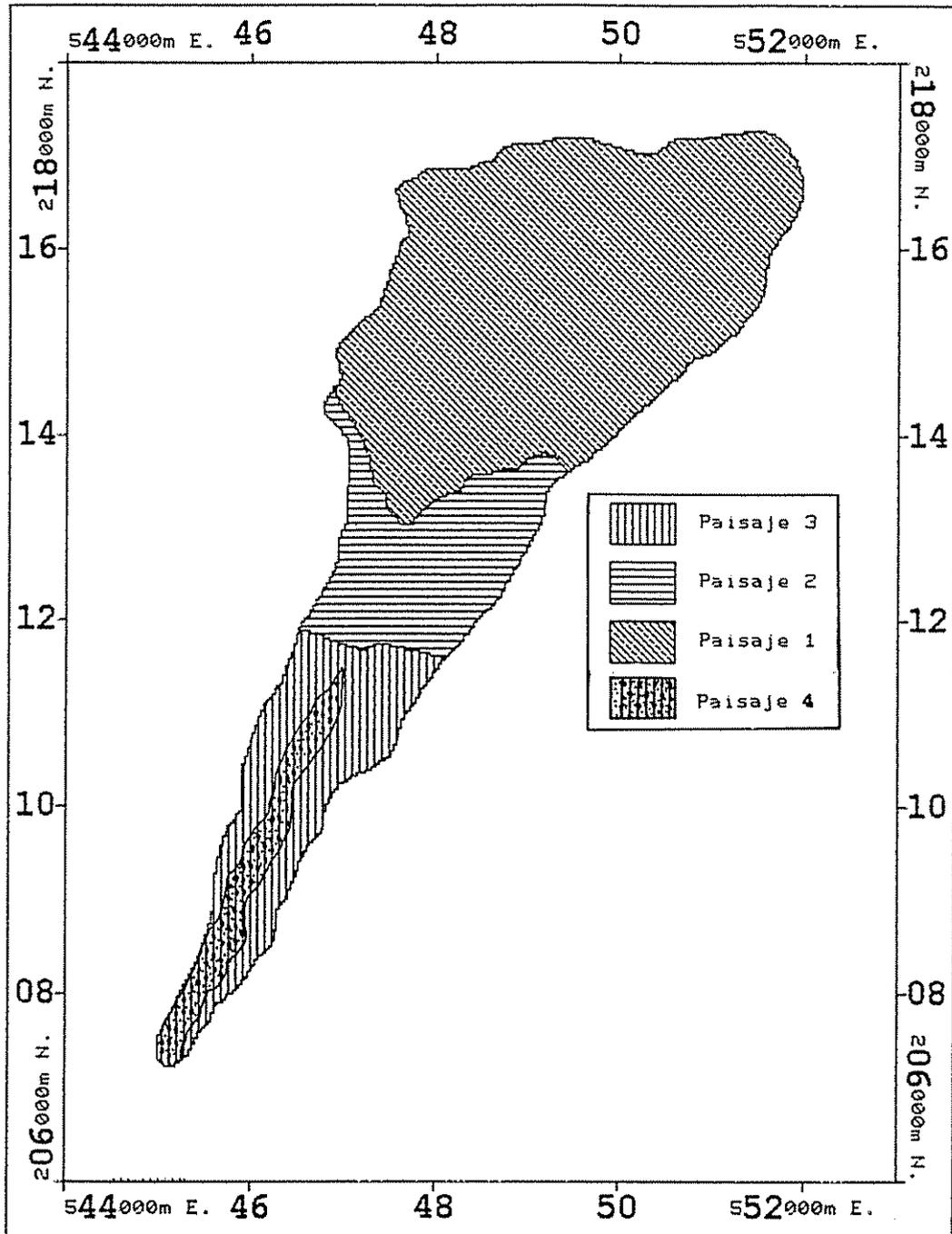
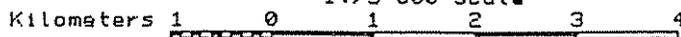


FIGURA 14: ZONAS GEOMORFOLOGICAS

PCI

CUENCA DEL RIO REVENTADO

1:75 000 Scale



Los valores obtenidos en el proceso anterior, estaban representados en el mapa en forma dispersa por lo que se agruparon en rangos, definiéndose en esta forma 4 clases de riesgos. En el Cuadro 31 se presentan las categorías de riesgos, su rango de fuerza tangencial en Newton (N), su área y el porcentaje que cubren en la cuenca y en la Figura 15 la representación espacial de este riesgo.

La Figura 16 presenta los valores de riesgo a diferente grado de inclinación de las vertientes, para los distintos suelos muestreados.

Cuadro 31 Categorías de Riesgo de Derrumbe, rango, área y porcentaje de cobertura en la cuenca

Categoría	Rango (N)	Area (ha)	Porcentaje (%)
1	0 - 1000	419.85	19.50
2	1000 - 2000	812.07	37.73
3	2000 - 3000	568.71	26.42
4	> - 3000	351.63	16.35

Los rangos obtenidos señalan valores de un riesgo cada vez mayor de deslizamiento, desde la clase 1 hasta la clase 4, esta última representa las zonas con mayores riesgos. Podemos observar en el Cuadro 31 que las áreas con mayor riesgo (> de 3000 N), representan el 16.35 % de la cuenca y corresponden a las zonas más escarpadas.

La determinación de las áreas con alto potencial de derrumbe o deslizamiento, tiene utilidad para prevenir problemas en el diseño de asentamientos humanos, en la construcción de carreteras, embalses, señalar las áreas más frágiles por efecto de la eliminación de la cobertura vegetal o un cambio en el uso de la tierra.

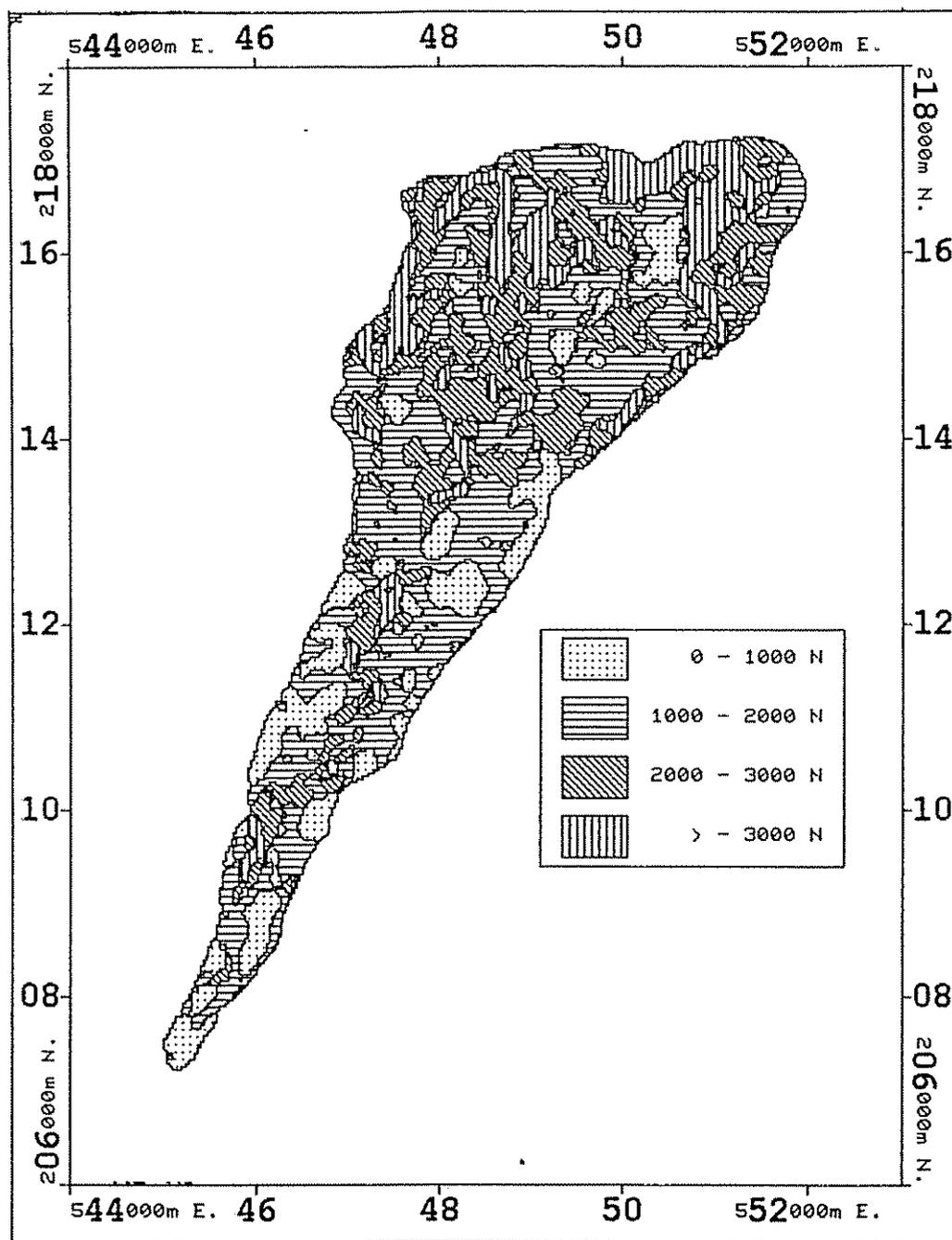


FIGURA 15: RIESGO DE DERRUMBE

PCI

CUENCA DEL RIO REVENTADO

1:75 000 Scale

Kilometers 1 0 1 2 3 4

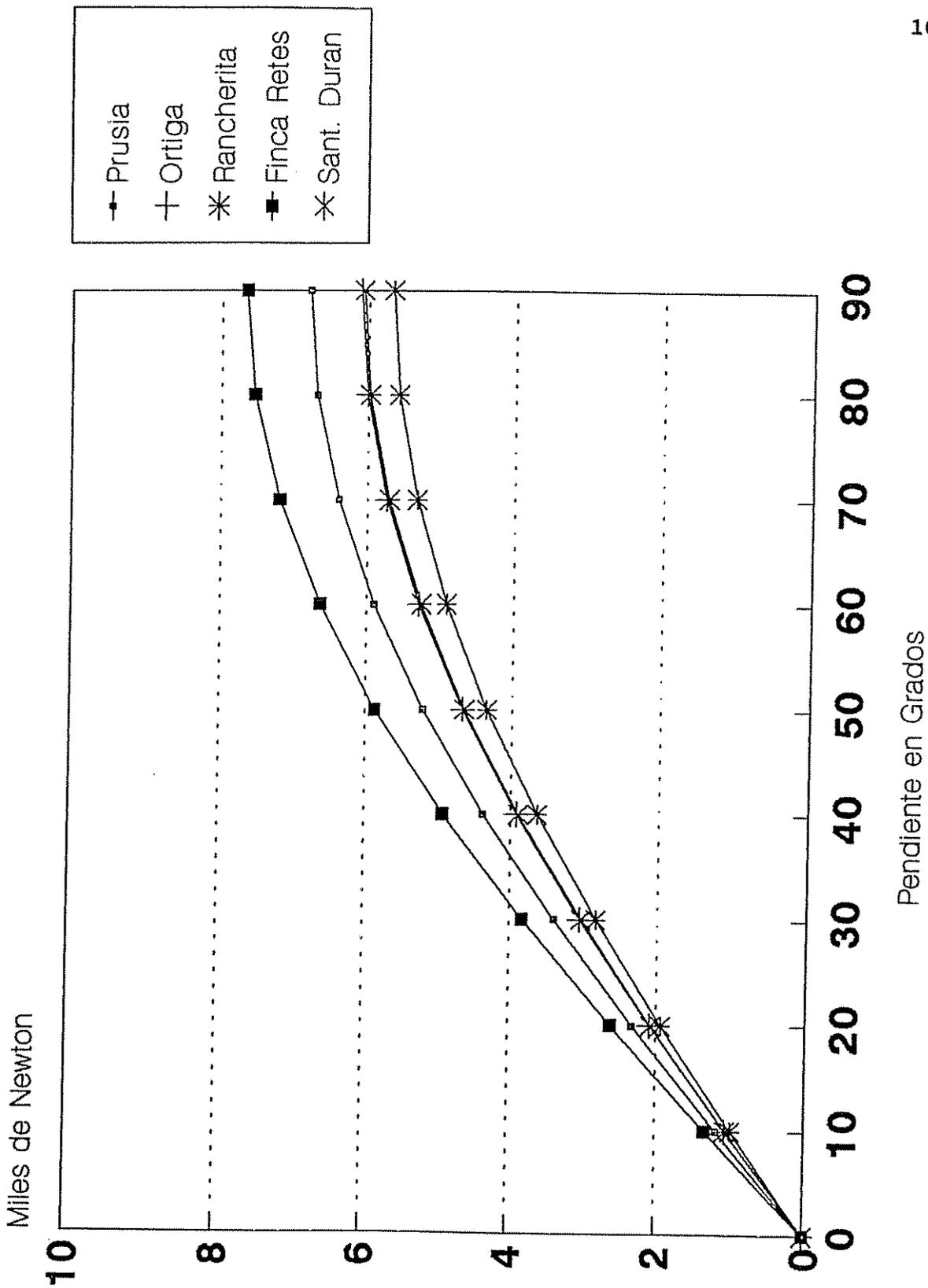


Figura 16 Riesgo de derrumbe según pendiente Cuenca Río Reventado

Se debe indicar que a esta fuerza tangencial, se oponen tensiones o fuerzas de resistencia que tratan de mantener el equilibrio del sistema, dentro de estas fuerzas tenemos (Collinet 1992):

- Enraizamiento vertical profundo,
- Capas del mismo suelo permanentemente más seco,
- Características físicas del suelo, como su cohesión que son todas las formas de conexión entre los elementos de la fase sólida y líquida, que permiten mantener la rigidez del suelo (fuerzas iónicas, puentes de Hidrógeno, fuerzas de Van der Waals, etc.),
- Las características del substrato de la capa del suelo considerado, que puede ser una capa más blanda y más coherente, o por el contrario más lubricante; presencia de rocas duras que forman un contacto abrupto y una ruptura de la cohesión.

Podemos además señalar que este es un modelo simplificado, ya que las causas que originan los derrumbes o deslizamientos son muy complejas y son producto de la combinación de diversos factores, pero los parámetros considerados en esta metodología se consideran como identificadores válidos de los riesgos de deslizamiento, que tienen la ventaja que la información necesaria para su evaluación puede obtenerse fácilmente en el campo o en documentos pedológicos, los parámetros utilizados para calcular los riesgos son universales, y pueden permitir la comparación entre zonas fragilizadas para riesgos semejantes (Collinet 1992).

Además su análisis mediante un sistema de información geográfico, es sencillo y puede permitir modelar fácilmente para diferentes condiciones de humedad conociendo la distribución de las lluvias en la zona considerada, señalando las épocas de mayor riesgo o puede también integrarse al modelo otros parámetros que ayuden a mejorar la validez de los resultados.

V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten plantear las siguientes conclusiones y recomendaciones:

La metodología propuesta por el CIDIAT, para la determinación de áreas críticas o prioritarias, puede ser implementada fácilmente utilizando un sistema de información geográfica; además, la utilización de un SIG, presenta ventajas con respecto a las metodologías tradicionales, ya que la base de datos puede ser actualizada fácilmente y permite la simulación y evaluación de diferentes alternativas de uso propuestas, en forma rápida y sencilla.

Los resultados de la aplicación de la metodología, permitieron identificar aquellas áreas que presentan un mayor riesgo de degradación de los recursos, debido al uso actual, características biofísicas y a la presión sobre el uso que ejercen las comunidades ubicadas en la cuenca. La localización espacial de estas áreas, se presentan en un mapa de áreas críticas.

La determinación de las áreas críticas según la metodología del CIDIAT, esta mas orientada a medir el efecto que tienen la mayoría de los parámetros, sobre la erosión y degradación de los suelos en función de su uso y cobertura, sin considerar otros aspectos como la conservación de la biodiversidad, importancia turística del recurso, zonas productoras de agua, áreas de derrumbe, etc.; esto significa que podría hacerse una adaptación de la metodología, incluyendo otros parámetros que ayuden a ampliar la validez de los resultados, considerando el término de áreas críticas en un contexto más general.

Uno de los factores que debería incluirse dentro del modelo general para la determinación de áreas críticas, podría ser el riesgo de derrumbe; las áreas que presentan mayor riesgo, son por definición áreas críticas, ya que estas zonas presentan un peligro potencial y deberían ser consideradas como áreas especiales al momento de definir los planes de manejo y rehabilitación para la gestión de la cuenca hidrográfica. Estas áreas deben ser consideradas en la planificación de asentamientos humanos (urbanización) y de construcción de infraestructura (carreteras, embalses, líneas de conducción).

El uso de un SIG facilita el análisis de la información espacial, se pueden calcular áreas, definir diferentes formas de agrupamiento de los parámetros, actualizar la información, incluir nuevos parámetros, simulación de cambios en los valores de los parámetros; todos estas aplicaciones pueden hacerse en forma automatizada. Lo anterior, demuestra que los SIG, constituyen una herramienta valiosa que sirve de apoyo, a los planificadores y decisores para definir proyectos, planes y estrategias de desarrollo para un país o región.

El modelo de Sheng, utilizado para la determinación del uso potencial de tierra, es un modelo sencillo de mucha aceptación por técnicos de campo y usuarios, fácil de aplicar y muy utilizado en países tropicales; pero, para mejorar la validez de los resultados, se recomienda incluir las áreas que protegen el cauce del río y la parte alta de la cuenca o zona productora de agua como una clase especial de uso de la tierra, que no debería entrar en el análisis espacial; esto evitaría clasificar como tierras aptas para cultivos, todas aquellas áreas planas y profundas que funcionan como zonas protectoras y productoras de agua.

Debemos señalar, que no todas las prácticas de conservación de suelos y aguas recomendadas por Sheng, para terrenos de laderas, pueden ser aplicadas en todos los suelos; en el caso de la cuenca alta de la zona de estudio, los suelos son derivados de cenizas volcánicas recientes, con un contenido del 8% de arcilla, 30% de limo y 62% de arena, lo que no permite la construcción de obras mecánicas como terrazas y bancales, debido a que estos suelos no tienen la cohesión suficiente para mantener la estructura de estas obras y pueden convertirse en un problema mas que en una solución, ya que pueden romperse por efecto de la saturación y dar origen a la formación de cárcavas. Para resolver este problema podrían recomendarse prácticas agronómicas como barreras vivas o sistemas agroforestales.

La aplicación de la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelos, se facilitó al utilizar un Sistema de Información geográfica; los resultados obtenidos con este modelo, deben ser considerados como un índice de riesgo de erosión, ya que la aplicación de esta metodología a nivel de cuenca, tiene algunas limitaciones para calcular los parámetros, especialmente el factor L (longitud de la pendiente). Este modelo debería correlacionarse con datos de campo para validar sus resultados, ya que tiene la ventaja con respecto a otros, que requiere de pocos parámetros y considera los factores más importantes que tienen efecto sobre la erosión de los suelos.

Un aporte valioso para la evaluación de la pérdida de suelos a nivel de cuenca podría ser mejorar la estimación de los factores que considera el modelo; para el cálculo del factor L, podría utilizarse un programa específico, que pueda calcular a partir del modelo de elevación digital, la relación que existe entre pixeles adyacentes, sitios de deposición de sedimentos, la variación en la orientación de la pendiente.

VII BIBLIOGRAFIA

- AGUILAR V., N. 1988. Determinación de prioridades y formulación de opciones de manejo para la conservación de suelos y aguas en la cuenca del río Caldera, Boquete, Panamá. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., Programa Universidad de Costa Rica/CATIE. 166 p.
- ALFARO S., M.; PALACIOS A., G. 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, C.R., Universidad Nacional. p. 144-163.
- AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMETRY. 1983. Manual of remote sensing. 2 ed. Ed. por Robert N. Colwell. Virginia, EE.UU. Sheridan. v.1
- ANYS, H.; BONN, F.; MERZOUK, A. ¿1992?. Remote sensing and GIS based mapping and of water erosion and sediment yield in a semi-arid watershed of Morocco. Quebec, Can., Université de Sherbrooke. 14 p.
- ARANA L., G. 1992. Análisis espacial para evaluar la erosión hídrica en la subcuenca del río Pensativo, Guatemala. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., CATIE. 116 p.
- ARCE, C.A. 1989. Priorización de las cuencas hidrográficas de Guatemala para propósitos de planificación del desarrollo. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., Programa Universidad de Costa Rica/CATIE. 202 p.
- ARNOLDUS, H. M. J. 1977. Predicting soil losses due to sheet and rill erosion. In FAO (Italia) FAO Conservation Guide 1. Guidelines for watershed management. Roma, Italia. p 99-124.
- BALTODANO, J.; HIDALGO, H. 1992. Definición de niveles de inundación en el Río Reventado. Tesis Lic. San José, C.R. Universidad de Costa Rica. 104 p.

- BEL INGENIERIA S.A.** 1987. Estudio de prefactibilidad para el riego de pequeñas áreas en la zona norte de Cartago y diseño de un plan piloto. Informe final. San José, C.R., s.n. s.p.
- BOLAÑOS, A.; FALLAS, J.** 1991. Cálculo de la erosividad de la lluvia y la erodabilidad del sustrato utilizando el índice de Fournier modificado y un sistema de información geográfico raster. In Congreso Forestal Nacional (2.,1992, San José, C.R.). Congreso. San José, C.R. p. 252-254.
- .; **FALLAS, J.** 1991. Evaluación de la 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, C.R., Universidad Nacional. p. 85-101.
- BRONZONI, G.; VILLALOBOS, F.** 1989. Cambio en el uso de la tierra y su relación con los fenómenos erosivos: análisis técnico de un caso en Tierra Blanca de Cartago. Investigación Agrícola (C.R.) 3(2):14-23.
- CASTRO, C.D.; ZOBECK, T.M.** 1986. Evaluation of the topographic factor in the universal soil loss equation on irregular slope. Journal of Soil and Water Conservation (EE.UU.) 41(2):113-116.
- CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO INTEGRAL DE AGUAS Y TIERRAS.** 1984. Metodología para la determinación de prioridades en cuencas hidrográficas. Mérida, Ven., Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. 38 p.
- CENTRO INTERAMERICANO DE FOTOINTERPRETACION.** 1981. Aplicación de los sensores remotos en la clasificación y levantamiento de los bosques húmedos tropicales. 1 ed. Cartagena, Col. Junta del Acuerdo de Cartagena. 125 p.
- COLLINET, J.** 1992. Evaluación y representación de los riesgos de derrumbes en las cuencas, utilizando las características hídricas de los suelos volcánicos. Proyecto ORSTOM-CATIE. Sin publicar. 20 p.

- CONGALTON, R.G.; GREEN, K. 1992. The ABCs of GIS, an introduction to geographic information systems. *Journal of Forestry* (EE.UU.) 90 (11): 13-20.
- COPPOCK, J.T.; RHIND, D.W. 1992. The history of GIS. In *Geographic information systems : principles*. Ed. by D.J. Maguire; M. F. Goodchild; D.W. Rhind. New York, EE.UU., Wiley. v. 1 p 21-43.
- CORTES, V. M.; OCONOTRILLO, G. 1987. Erosión de suelos hortícolas en el área de Cot y Tierra Blanca de Cartago. Tesis Lic. San José, C.R., Universidad de Costa Rica. 158 p.
- DEAGOSTINI, D. 1975. Sensores remotos y principios de percepción remota. Bogotá, Col., Centro Interamericano de Fotointerpretación. 157 p.
- DENGO, M. B. 1988. Sistemas de información geográfica: herramienta para el manejo integrado de los recursos naturales. Turrialba, C.R., CATIE. 16 p.
- DISSMEYER, G.E.; FOSTER G.R. 1981. Estimating the cover-management factor (C) in the universal soil loss equation for forest conditions. *Journal of Soil and Water Conservation* (EE.UU.) 36 (4) : 235-240.
- EASTMAN, J.R. 1992. IDRISI. Technical reference. Versión 4.0. Worcester, Massachusetts, EE.UU. Clark University. 202 p.
- 1992. IDRISI. User, guide. Versión 4.0. Worcester, Massachusetts, EE.UU. Clark University. 178 p.
- FALLAS G., J. ¿1992?. Cuenca del río Reventado: restauración y manejo ante desastres naturales. Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional, Escuela de Ciencias Ambientales. 4 p.
- FAUSTINO, J. 1987. Variables determinantes en la identificación de áreas críticas en tierras de ladera. In *Conferencia Usos sostenidos de tierras en laderas (1987, Quito y Salcedo, Ec.) Memoria*. Washington, D.C., EE.UU., Development Strategies for Fragile Lands. p. 4-41.

- FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. 1975. Manual de conservación de suelos de ladera. Bogotá, Col., Cenicafe. 267 p.
- FURCAL B., P. 1992. Caracterización hídrica de los suelos del proyecto de riego de Tierra Blanca, Cartago. San José, C.R. SENARA. p. 17.
- GONZALEZ DEL TANAGO, M. 1991. La ecuación universal de la pérdida de suelos; pasado, presente y futuro. Ecología (España) 5:13-50.
- HARTSHORN, G. 1982. Costa Rica, perfil ambiental. San José, C.R., Editorial Trejos. 152 p.
- HERNANDEZ, G. 1991. Métodos morfométricos en la identificación de áreas críticas en procesos erosivos. In Taller de erosión de suelos (1991, Heredia, C.R.) Memoria. Heredia, C. R., Universidad Nacional. p. 48-67
- HYMAN, G.G. 1990. Identification of critical sources areas of sediment pollution: South Fork, New River. Tesis M.A. North Carolina, EE.UU., Appalachian State University. 64 p.
- INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD. 1964. Solución al problema del Río Reventado; Informe preliminar. San José, C.R. I.C.E., Departamento de Geología. 67 p.
- 1965. Informe sobre el problema del Río Reventado. San José, C.R. I.C.E., Departamento de Geología. 310 p.
- 1986. Informe Geológico - Geotécnico del deslizamiento de San Blás L.T. Río Macho - Colima. San José, C.R. I.C.E., Departamento de Geología. 214 p.
- 1988. Informe sobre la auscultación del deslizamiento San Blás, paso de las líneas de transmisión Río Macho- el Este y Cachí el Este (antigua línea Río Macho-Colima) por el Río Reventado, Cartago, Costa Rica. San José, C.R. I.C.E., Departamento de Geología. 6 p.

- KIRKBY, M.J.; MORGAN, R.P.C. 1984. Erosión de suelos. Comp. por M.J. Kirkby y R.P.C. Morgan. 1 ed. México D.F., Méx., Limusa. 375 p.
- LEONARD, H.J. 1986. Recursos naturales y desarrollo económico en América Central: un perfil ambiental regional. Trad. G. Budowski y T. Maldonado. San José, C.R., CATIE. 267 p.
- LIRA CH., J. 1977. La percepción remota y los recursos naturales. México, Centro Científico de America Latina. 19 p.
- MACLEAN, A.L.; REED, D.D.; MROZ, G.D.; LYON, G.W.; EDISON, T. 1992. Using GIS to estimate forest resources changes. A case study in northern Michigan. Journal of Forestry (EE.UU) 90 (12) : 22-25.
- MAGUIRE, D.J. 1992. An overview and definition of GIS. In Geographic information systems: principles. Ed. by D.J. Maguire; M.F. Goodchild; D.W. Rhind. New York, EE.UU.,Wiley. v. 1 p 21-43.
- MELO A., H.M. 1991. La conservación de suelos en Tierra Blanca, Cartago, Costa Rica. Niveles de adopción y alternativas para incrementarlos. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., CATIE. 143 p.
- MENDIETA D., M.R. 1989. Diagnóstico integral de la cuenca del Río Danto, La Ceiba, Honduras; acciones estratégicas para la formulación de un plan de manejo. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., CATIE. 244 p.
- MITCHELL, J.K.; BUBENZER, G.D. 1980. Estimación de la pérdida del suelo. In Erosión de suelos. Trad. por J. Hurtado. Ed. por M.J. Kirkby y R.P.C. Morgan. México, Limusa. p. 35-88.
- MORA C., I. 1987. Evaluación de la pérdida de suelo mediante la ecuación universal (EUPS); aplicación para definir acciones de manejo en la cuenca del Río Pejibaye, Vertiente Atlantica, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., CATIE/Universidad de Costa Rica. 104 p.

- MORA, S. 1987. Análisis preliminar de la amenaza y vulnerabilidad potenciales generadas por el Río Reventado y el deslizamiento de San Blas, Cartago, Costa Rica. Tecnología en Marcha (C.R.) 9(1):19-37.
- MORERA, C.M.; FALLAS, J. 1992. Aplicaciones de los sistemas de información geográfica en el modelaje hidrológico a nivel de cuenca hidrográfica. In Congreso Forestal Nacional (2., 1992, San José, C.R.). Resumen de ponencias. San José, C.R. LIL. p 255-256.
- OLAYA, A.A. 1985. Metodología para determinar prioridades de manejo integral de cuencas hidrográficas y su aplicación en Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., Programa Universidad de Costa Rica/CATIE. 192 p.
- ROOSE, E.J. 1977. Application of the USLE of Wischmeier and Smith in West Africa. In Internatinal Conference on Soil Conservation and Management in the Humid Tropics. (1975, Ibadan, Nigeria). Proceedings. Ed. by D.J. Greenland; R. Lal. Chichester, J. Wiley. p 177-187.
- SABORIO, J. 1988. La percepción remota y su aplicación en la evaluación de los recursos naturales. Turrialba, C.R. CATIE. 26 p.
- . 1992. Curso de sistemas de información geográfica. Notas de clases. s.n.t.
- SEGOVIA, A. 1988. Aplicación de los sensores remotos en el inventario de los recursos naturales. Quito, Ec. Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos. 59 p
- SHENG, T.C. 1990. Conservación de suelos para los pequeños agricultores en las zonas tropicales húmedas. Boletín de suelos de la FAO no. 60. 121 p.
- . 1981. Planificación física para cuencas. Trad. por O.E. Ferreiro y H. Fernández. Kingston, Jam., Ministerio de Agricultura. 43 p.

TALLER METODOLOGIAS DE CLASIFICACION DE CAPACIDAD DE USO DE LA TIERRA (1987, LA CEIBA, HOND.) 1987. Memoria. Tegucigalpa, Hond., CATIE. 160 p.

VAHRSON, W.G. 1991. Aspectos climáticos de la erosión hídrica en Costa Rica, America Central. In Taller de erosión de suelos (1991, Heredia, C.R.).Memoria. Heredia, C.R., Universidad Nacional. p. 33-47.

-----; CERVANTES, C. 1991. Escorrentía superficial y erosión laminar en Puriscal, Costa Rica. In Taller de erosión de suelos (1991, Heredia, C.R.). Memoria. Heredia,C.R., Universidad Nacional. p. 116-130.

WISCHMEIER, W.H.; JOHNSON, C.B.; CROSS, B.V. 1971. A soil erodability nomograph for foamland 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. USDA. Agriculture Handbook no. 537. 58 p.

ANEXOS

ANEXO 1 Archivo de valores utilizado para asignar los pesos a los parámetros del CIDIAT.

ARCHIVO DE VALORES	PARAMETRO
VAL2.VAL 1 1.36	Tipo de drenaje
VAL3456.VAL 1 3.06 2 4.68 3 6.3 4 9.0	Erosión Leve Moderada Fuerte Muy Fuerte
VAL7.VAL 1 2.34	Rocas Blandas
VAL8.VAL 1 3.76 2 3.29 3 3.29	Relación Vertientes/áreas planas
VAL9.VAL 1 0.748 2 3.74 3 3.74	Proyectos Conservación Ejecutados
VAL-10.VAL 1 0.561 2 2.81 3 2.81	Proyectos Fomento Agropecuario
VAL-12.VAL 1 2.2	Fuentes disponibles de agua
VAL-13.VAL 1 4.95	Obras para control de crecidas
VAL-15.VAL 1 3.96 2 0.44 3 0.44	Abastecimiento actual de agua
VAL-16.VAL 1 3.6 2 .40 3 .40	Abastecimiento futuro de agua

Continúa

..... Continuación ANEXO 1

VAL-17.VAL	Capacidad productiva actual
1 5.53	
2 3.25	
3 1.11	
VAL-18.VAL	Protección de la vegetación
1 0.0	
2 6.66	
3 2.96	
4 1.11	
5 4.81	
6 6.66	
VAL-19.VAL	Contaminación ambiental
1 0.066	
2 3.3	
3 1.81	
VAL-20.VAL	Población campesina vertiente
1 0.705	
2 1.88	
3 0.705	
VAL-21.VAL	Población campesina áreas planas
1 0.585	
VAL-24.VAL	Nivel de instrucción del usuario
1 1.95	
VAL-25.VAL	Infraestructura establecida
1 3.0	
VAL-26.VAL	Densidad pobl. urbana vertientes
1 1.122	
2 5.61	
3 3.3	
VAL-27.VAL	Densidad plob. rural vertientes
1 1.071	
2 3.15	
3 3.15	
VAL-28.VAL	Penetración campesina vertientes
1 0.935	
2 2.75	
3 2.75	

Continúa

..... Continuación ANEXO 1

VAL-29.VAL	Explotación de los bosques
1 1.547	
2 7.735	
3 7.735	
VAL-30.VAL	Explotación de los suelos
1 0	
2 1.479	
3 7.395	
4 1.479	
5 7.395	
VAL-31.VAL	Quemas en vertientes
1 1.139	
VAL-32.VAL	Quemas áreas planas
1 0.884	
VAL-33.VAL	Precipitación media anual
1 4.05	
2 3.38	
3 2.25	
4 1.35	
VAL-34.VAL	Intensidad de la precipitación
1 2.52	