CENTRO AGRONOMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA

PROGRAMA DE ENSEÑANZA

AREA DE POSGRADO

ESTIMACION DE LA EROSION DEL SUELO A NIVEL DE CUENCA, UTILIZANDO ANALISIS ESPACIAL Y PERCEPCION REMOTA, EN EL SALVADOR.

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

Magister Scientiae

por

Victor Manuel Castillo Aguilar

Turrialba, Costa Rica

1992

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

MAGISTER SCIENTIAE

FIRMANTES:

Jorge Faustino, M. Sc.
Profesor Consejero

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

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

Víctor Castillo A.

Víctor M. Castillo Aguilar
Candidato

INDICE

Pág.

1 INTRODUCCION 1

1.1 Objetivo general 3

1.2 Objetivos específicos 3

2 ANTECEDENTES 4

2.1 Generalidades 4

2.2 El mecanismo de erosión del suelo 9

2.2 El modelo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) 11

2.2.1 Factor de Erosividad de la Lluvia (R) 13

2.2.2 Factor de Erodibilidad del Suelo (K) 17

2.2.3 Factor de Coeficiente Topográfico (LS) 18

2.2.4 Factor de Coeficiente de Cultivo (C) 21

2.2.5 Factor de Prácticas de Conservación (P) 23

2.3 Utilización de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para evaluar los recursos naturales 25

3 LOCALIZACION Y DESCRIPCION DE FACTORES BIOFISICOS DE LA CUENCA DEL RIO LAS CAÑAS 28

3.1 Ubicación y Superficie 28

3.2 Geomorfologia y materiales parentales 28

3.3 Suelos 31

3.4 Clima 33

3.5 Uso de la tierra 33

4 MATERIALES Y METODOS 37

4.1 Información Disponible 37

4.2 Materiales 37

4.3 Metodología 37

5 ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS 43

5.1 Los factores de la USLE 43

5.1.1 Cálculo del factor de erosividad de la lluvia (R) 43

5.1.2 Determinación del factor de erodibilidad del suelo (K) 45

5.1.3 Valores del factor LS calculados 49

5.1.4 Valores del factor CP calculados 51

5.2 Estimación de la erosión total en la cuenca del río Las Cañas aplicando la USLE 54

5.3 Análisis del comportamiento de la erosión en la cuenca, estimada con un SIG y la USLE 57

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 64

7 BIBLIOGRAFIA 66

ANEXOS 71

Lista de Cuadros en el Texto

Cuadro No. Pag.

1 Clasificación de las tormentas erosivas de mayor duración en El Salvador. 16

2 El factor de cobertura vegetal y técnicas de cultivo (C) en Africa Occidental 23

3 Factor de método de control de la erosión (P) 25

4 Valores del factor R en la cuenca del río Las Cañas 43

5 Valores del factor K según serie de suelo en la cuenca del rio Las Cañas 47

6 Valores del factor LS en la cuenca del río Las Cañas 49

7 Valores del factor CP en la cuenca del río Las Cañas 51

8 Distribución porcentual de la erosión en la cuenca del rio Las Cañas. 54

9 Distribución de frecuencias acumuladas de valores calculados de erosión real en la cuenca del río Las Cañas 58

Lista de Figuras y Mapas en el Texto

Fig. No. Pag.

1 Mapa de localización del área de estudio. Cuenca del río Las Cañas, El Salvador 29

2 Mapa de distribución del factor R en la cuenca del río Las Cañas . 44

3 Mapa de distribución del factor K en la cuenca del río Las Cañas . 46

4 Mapa de distribución del factor LS en la cuenca del río Las Cañas . 50

5 Mapa de distribución del factor CP en la cuenca del río Las Cañas . 52

6 Mapa final de clases de erosión en la cuenca del río Las Cañas 55

Lista de Cuadros y Figuras en el Anexo

Anexo No.		Pag.
Anexo 1.	Tabla de valores de energía cinética de la lluvia en función de su intensidad.	71
Anexo 2.	Nomograma para calcular la Erodiblidad del Suelo	72

RESUMEN

CASTILLO A., V. M. 1992. Estimación de la erosión a nivel de cuenca, utilizando análisis espacial y sensores remotos, en El Salvador.

Palabras claves: El Salvador, erosión, análisis espacial, SIG, sensores remotos, cuenca, río Las Cañas.

La erosión es la causa principal de la degradación de los suelos y la calidad del agua en los trópicos. Asimismo, los factores climáticos, biofísicos y topográficos asociados con la presión por la tierra dado el crecimiento de la población, convierten a El Salvador, en un sitio propicio para el fenómeno de la erosión.

El objetivo del estudio es estimar la erosión hídrica laminar a nivel de cuenca, utilizando información de sensores remotos, integrándola por medio de análisis espacial y un modelo matemático conceptual, suponiendo que una estimación general, es útil para identificar la magnitud de un problema y así poder justificar análisis puntuales.

Para realizar la investigación se utilizó información referente a factores naturales de la zona, que fueron actualizadas por comprobación en el campo, para lograr una mejor estimación de la pérdida de suelo.

La erosión se cuantificó e identificó espacialmente partiendo de la información proporcionada por los sensores remotos y con los factores de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), elaborados en forma de mapas, que se integraron en un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Los resultados, mostraron la pérdida de suelo asociada con diferentes usos de la tierra; relacionando desde zonas con buena cobertura vegetal y tasas bajísimas de erosión, hasta áreas en proceso de urbanización, con tasas alarmantes de erosión; especialmente áreas de suelos inestables, cercanas al lecho y riberas del río, que presentan altas tasas de erosión.

Se concluye que hay mayor intensidad de erosión en las zonas bajas o, que existen tasas altas de transporte de sedimentos, desde las parte altas. También, en las áreas asociadas a zona urbana o cultivos de tabaco y maíz, que representan la parte agrícola con mayor aporte de sedimentos, se recomienda la introducción de prácticas de conservación de suelos; mientras que en el área urbana, podría recomendarse el establecimiento de obras mecánicas.

Ya que hay mayor erosión en la parte baja, se espera mayor sedimentación en la represa, ya que gran cantidad de sedimentos pasarán en un periodo de tiempo próximo a ser parte del aporte total de sedimentos de la cuenca

Es importante simular con el modelo cuánto afecta la erosión total, el elevar los contenidos de materia orgánica en los suelos, o el modificar las prácticas de conservación y patrones de cultivo actuales de la cuenca.

SUMMARY

CASTILLO A., V. M. 1992. Erosion estimation on watershed level, using spatial analysis and remote sensing, in El Salvador

Keywords: El Salvador, erosion, spatial analysis, GIS, remote sensors, watershed, Las Cañas river.

Erosion is the main cause of soil and water quality degradation on the tropics. Besides, the climatic, biophysical and topographycal factors associated with land pressure because of population growth makes El Salvador, a favorable area for soil erosion phenomena.

The present study objective is the estimation of hydric sheet erosion on watershed level, using remote sensing information, integrating it by the mean of spatial analysis and a mathematical conceptual model, supposing that a general estimation, is useful to identify the magnitude of a problem and then justifies prompt analysis.

In order to realize the investigation were used informations refered to natural factors of the zone, which were actualized by field comprobation, to achieve a better estimation of soil losses.

The erosion was figured out and identified spatially from the information provided by remote sensing and with the Universal Soil Loss Equation (USLE) factors, elaborated as maps, which were integrated on a Geographical Information System (GIS).

The results, showed the soil loss associated with different land uses, showing from areas with good vegetal covering and very low erosion rates, to areas on urbanization process, with alarming erosion rates; specially unstable soils areas, near to the river bed and banks, where the erosion rates are very high.

It can be concluded that there is a higher erosion on lowlands, or exists high sediments transportation rates, from the high lands. Besides, the areas associated with urban area or tobbaco or corn crops, which represents the agricultural area with higher sediments contribution, can be recommended the introduction of soil conservation practices; while on urban area can be recommended the stablishment of mechanical structures.

Given the higher erosion on lowlands, can be expected a higher sedimentation on the dam, because of the big quantity of sediments that will pass on a short period of time as sediments contribution from the watershed.

It is important the simulation with the model how affects the total erosion, the raising of organic matter contents on soils, or the modifying of conservation practices and the actual crop patterns on the watershed.

1 INTRODUCCION

El suelo es un recurso natural especialmente importante para los países de vocación agrícola, que sustentan gran parte de su economía en este sector, en los cuales la erosión o degradación del suelo representa una limitante para la adecuada actividad productiva de la agricultura.

La erosión es un proceso natural a escala geológica que causa la pérdida de la capa superficial fértil del suelo, por impacto del agua, el escurrimiento superficial o, la acción selectiva del viento. La acción directa o indirecta del hombre sobre el equilibrio natural acelera el proceso, conviertiéndolo en un fenómeno adverso que causa pérdidas al potencial productivo y la calidad del recurso. Además, ocasiona daños a la infraestructura de generación hidroeléctrica, caminos, puentes y abastecimiento de agua.

En la cuenca del rio Lempa se encuentra ubicada la red de generación hidroeléctrica de El Salvador, siendo la represa del Cerrón Grande, una obra muy importante que actualmente presenta graves problemas de sedimentación.

Estudios preliminares indican que una de las áreas de mayor aporte de sedimentos es la cuenca del río Las Cañas, subcuenca del río Acelhuate, el cual es afluente del Lempa; donde se presentan suelos formados de materiales parentales sueltos (cenizas) con cohesión débil entre los elementos granulométricos y los agregados (si existen), lo que trae consecuencias negativas previsibles para las diferentes formas

de erosión. Además, en los sistemas productivos, la rentabilidad de los cultivos es baja, en parte debido a la erosión, lo que supone un manejo inapropiado y condiciones de fertilidad deficientes en los suelos.

Por otra parte, una forma de analizar las variables que inciden en la erosión, a bajo costo y de manera multidisciplinaria, es con un Sistema de Información Geográfica (SIG); el cual incorpora datos georeferenciados, para automatizar la información espacial, permitiendo evaluar la dinámica de los procesos naturales y entender mejor sus interacciones, lo que es muy útil en el proceso de toma de decisiones, ya que al evaluar los factores de interés permite ejecutar acciones acertadas donde sea necesario, maximizando soluciones; con lo que se hace posible alcanzar la sostenibilidad del recurso a largo plazo, acción fundamental del Manejo de Cuencas.

La Comisión Ejecutiva del Lempa (CEL) de El Salvador, posee un SIG basado en el software ERDAS, para evaluar el estado de los recursos naturales y sus procesos de degradación, a nivel de cuenca, particularmente la erosión de suelos. Hasta la fecha, sólo se han realizado análisis descriptivos (de inventario), pero existen oportunidades potenciales de incluir estudios prescriptivos (modelado y análisis de los mapas), para ampliar los usos de esta tecnología y así disponer de opciones en el proceso de toma de decisiones para manejar los recursos; por eso, el presente estudio plantea los siguientes objetivos:

1.1 Objetivo General:

-Estimar la erosión hídrica laminar a nivel de la cuenca del río Las Cañas.

1.2 Objetivos Específicos:

-Cuantificar y determinar el comportamiento de la erosión mediante la aplicación del modelo USLE a nivel de cuenca.

-Establecer la distribución espacial de la erosión hídrica laminar en la cuenca, utilizando información de sensores remotos por medio de análisis espacial.

Se pretende validar una metodología que incorpore información de sensores remotos, técnicas de análisis espacial y un modelo matemático conceptual para estimar la erosión a bajo costo, de tal forma que el estimado general resultante sea mejor que muchas observaciones puntuales.

Debe considerarse que el presente estudio debe considerarse como una "primera aproximación" de la erosión en la cuenca, ya que no incluye erosión del cauce como tal, ni caminos o área de viviendas, lo que requeriría de información más detallada.

Con la información obtenida, será factible hacer recomendaciones para un manejo integral del área, con el fin de detener el proceso erosivo actual, lo que redundará en beneficios por mejores cosechas y disminución del azolvamiento en las represas e incremento de su vida útil. Además, se reduce la posibilidad de pérdida de vidas y daño a los núcleos poblacionales, producto de procesos críticos de erosión avanzada, como derrumbes o deslizamientos..

2 ANTECEDENTES

2.1 Generalidades.

Actualmente la degradación de los recursos naturales a nivel mundial es crítica (Fundation for International Training; Open Learn Agency, 1990).

La erosión de suelos en los trópicos, es la principal evidencia de que el fenómeno de degradación física está ocurriendo y puede observarse a través de la medición del arrastre de sedimentos en las corrientes de agua de la cuenca. (Zúniga, 1989).

En países de vocación agrícola, la degradación física del suelo inducida por el hombre disminuye su capacidad actual o futura para soportar la vida (Oldeman, 1988; citado por Zúniga, 1989)y este fenómeno es causado mayormente por sobreexplotación de los recursos, conflictos sociales internos y falta de alternativas apropiadas, factibles de implementarse, para los productores.

Se considera que las causas más importantes de la destrucción del suelo son: la falta de cobertura vegetal durante períodos críticos del ciclo agrícola, cuando el viento y la lluvia producen pérdidas de suelo devastadoras y, la sobre-explotación de tierras marginales, lo cual expone los suelos poco profundos e inestables, a las fuerzas de la erosión. El resultado neto es que más de $25x10^6$ toneladas de suelo superficial son removidas de las tierras de cultivo cada

año, sumadas al suelo que se pierde por erosión natural. Así, en los Estados Unidos, se pierde un 44% de tierras de cultivo por esta causa; en El Salvador un 77% de la tierra total está seriamente erodado y un 38% de las tierras de cultivo en Nepal han sido abandonadas por causa de la degradación del suelo (Our Planet, 1992).

A nivel intertropical (Sheng, 1990) se han medido pérdidas de suelo a nivel de parcela y en condiciones de cultivo tradicional, de 100-200 T/ha/a, en Taiwán (Asia sudoriental). Mientras que en Marruecos (Africa del Norte), se estimaron con la USLE y sensores remotos, pérdidas de hasta 60 T/ha/a en terrenos sin vegetación y con precipitación anual de 422.8 mm (Anys et al, 1991). Asimismo, a nivel de cordillera centroamericana, en Costa Rica, Oreamuno y Saborío (1989) estimaron una erosión máxima, en condiciones de suelo desnudo y sin prácticas de conservación, de 119 T/ha/a, utilizando siempre información de sensores remotos y la USLE.

Según el Perfil Ambiental...(EMTECSA, 1985) en El Salvador, se calculó un 60% de los suelos en estado de erosión avanzada; sin embargo, este no es un fenómeno reciente, ha sido observado por decenios, así Standley (1924; citado por Daugherty, 1973) describió su intensidad, de la siguiente manera:

"En ciertas partes los cerros han sido en extremo erosionados por el agua corriente y la lluvia, y se parecen a las " tierras malas " de la región occidental de Estados Unidos. Enormes barrancas de varios centenares de pies de

profundidad, se hallan separadas por paredes delgadas de sólo unos metros de espesor, de manera que lenta --y no muy lentamente-- se disuelven. En ninguna parte de la tierra hay mayor necesidad de proceder a la conservación de los árboles y demás vegetación natural, o de encontrar sustitutos eficaces de los mismos".

Asimismo en un estudio de los problemas de conservación efectuado en 1946 se describía la erosión como: "El problema más grave que actualmente tiene ante sí la República de El Salvador" (Bourne et al, 1946; citado por Daugherty, 1973), quien entonces calculó que 25% de la totalidad del país sufría erosión intensa y el resto estaba moderadamente erosionado.

Así, el fenómeno ecológico trascendental que acompañó la destrucción de bosques y selvas tropicales, ha sido la erosión acelerada del suelo, al cual se considera como uno de los recursos naturales más valiosos de El Salvador; ya que, las observaciones efectuadas en los años 1968-74 indican que el fenómeno ha proseguido a un ritmo rápido desde 1946 y sigue representando un problema ecológico y económico de grandes proporciones (Daugherty, 1973).

Aunque la erosión ha ocurrido en todo el país, ha sido más afectada la cordillera Norte, que incluye las laderas inferiores de la región noroeste, originalmente cubiertas de bosques caducifolios y asociación pino - roble, que han sido sometidas a una larga historia de rotación de cultivos, que se tornó más permanente a medida aumentaba la población humana. Asimismo, gran parte de la capa superior del suelo ha sido

destruida y desprovista de vegetación, se cultiva por métodos inapropiados o se aprovecha para pastos (Daugherty, 1973).

Asimismo, se confirma que los efectos de la erosión en el país son significativos; así el número y profundidad de cárcavas, principalmente en las laderas, año con año es mayor. La sedimentación, pérdida de la profundidad efectiva y fertilidad natural, así como la pérdida de tierras agrícolas por derrumbes, hundimientos y deslizamientos, siguen la misma tendencia (Bueno, Hernández, Lazo; 1990).

También, la erosión ha afectado la red de generación hidroeléctrica, ya que el río Lempa alcanzó cargas de más de 170,000 Ton. métricas de sedimento en 24 horas, en días de lluvias fuertes (Emden, 1959; citado por Bueno, Hernández, Lazo; 1990), con lo que contribuye a la disminución de la productividad hidroeléctrica. Así, Vogt (1963; citado por Daugherty, 1973), calculó pérdida del 40% de capacidad de embalse en la presa 5 de Noviembre (sobre el río Lempa) en un plazo de 30 años; lo cual fue confirmado por Heymans (1975; citado por Bueno, Hernández, Lazo; 1990) que estimó la pérdida del 47% del volumen útil del embalse, en un periodo de 20 años (1954-1974) producto de la sedimentación.

Además, el estado avanzado de erosión acelerada ha causado pérdida permanente de considerables extensiones de tierra y, ha creado problemas de abastecimiento de agua potable, ya que, la rápida escorrentía, escasa absorción y almacenamiento de la lluvia por el suelo, la falta de reposición de los manantiales subterráneos, mayor evaporación superficial y la creciente

demanda poblacional han agravado el problema (Daugherty, 1973).

Estudios (Hudson, 1979; citado por ODA, 1981) han reportado que grandes cantidades de sedimentos originados en los sitios de construcción en San Salvador y alrededores, ingresan a los ríos, llegándose a estimar una tasa promedio de erosión para sitios de construcción, de 1000 T/ha (para los años 1953-72). Asimismo (ODA, 1981) se calcularon tasas de hasta 100 T/ha en caminos rurales y vecinales, ya que la mayoria están sin pavimentar y en grandes pendientes.

También, Heymans (1975, citado por Bueno, Hernández, Lazo; 1991) reportó que la ciudad de Metapán (noroccidente del país) sufrió daños materiales cuantiosos, por sedimentación en 1959, producto de la erosión en cárcavas en la parte alta de la cuenca del río San José.

También se midió estimó en parcelas experimentales de escorrentía una pérdida de hasta 127 T/ha en cultivo tradicional de maíz-frijol en suelos arcillosos, en el distrito de Metapán (Sheng, 1975; citado por ODA, 1981).

En ausencia de evidencia cuantificable, es difícil evaluar la efectividad de las varias formas de erosión en el país; las observaciones de campo muestran evidencia de la erosión por salpicadura y laminar en campos de cultivos con pendiente mayor de 3°. La erosión en surcos es menor en campos trabajados a mano, que donde se utiliza maquinaria o en las áreas por urbanizar. Las cárcavas temporales se desarrollan en muchas áreas y se vuelven permanentes donde hay cortes de

tierra (taludes) o fuertes pendientes. Asimismo, no está definida la importancia relativa de esas formas de erosión ni sus tasas de deposición y transporte (ODA, 1981).

2.2 El mecanismo de erosión del suelo.

Los procesos principales de remoción de sedimentos son: la solución, la erosión y el movimiento de masas, siendo cada uno dominante en ambientes adecuados.

La solución, considerándola como acción y efecto, es la primera parte de esta forma de erosión en la cual se da movilización de los elementos sobre una forma transferible por los flujos. En efecto, existe solución dentro de los materiales lixiviados producto de la meteorización de los minerales, que no se exportan.

Es importante mencionar que al comparar la solución y su efecto en la profundización del suelo contra la erosión superficial, habría que decir, que estos procesos no intervienen en la misma escala de tiempo y pueden coexistir, ya que nunca se observó en la naturaleza un 100% de escurrimiento.

Según Kirkby y Morgan (1984), la erosión del suelo es la remoción del material superficial por acción selectiva del viento o el agua. El criterio más amplio es compararlo con otros procesos de desgaste del paisaje, con perspectiva a un contexto mundial y una escala de tiempo geológico.

Después debe intervenir el transporte, cuando las pendientes alcanzan gradientes estables, iniciando procesos de infiltración de sustancias hacia las profundidades, lo que es muy efectivo para disolver materiales del suelo y la base rocosa, desgastando la superficie del terreno y convirtiéndola en nuevo suelo.

Por otro lado, la erosión hídrica es mayor donde la disolución es menor; la lluvia no se infiltra y fluye sobre la superficie, viajando a una velocidad tal que puede arrancar materiales del suelo por medio de la fuerza hidraúlica del flujo.

Donde el flujo superficial es dominante, la erosión hídrica es el proceso principal de desgaste. Como la disolución es ligera, el agua fluye en grandes cantidades sobre la superficie ejerciendo grandes fuerzas hidraúlicas con resultados catastróficos.

También, la erosión intensa está asociada con procesos de incisión de cárcavas, que inician movimientos de masas desde las pendientes inclinadas alrededor de dichas cárcavas. Tales movimientos desempeñan un papel importante en la eliminación total de sedimentos.

La erosión es causada por la fuerza con que el fluido (aire o agua) actúa sobre las partículas del suelo, por lo que depende en cierto grado la aspereza de la superficie. Así, en una superficie áspera (con vegetación o matorrales) la velocidad del fluído disminuye o permanece constante; en una

superficie lisa (suelo desnudo) aumenta la velocidad, volviéndose más erodable (Dissmeyer y Foster; 1984).

Según Kirkby y Morgan (1984), hay pocas mediciones precisas de la erosión; bajo condiciones naturales, se han registrado pérdidas de hasta 10 mm/año, por erosión eólica, mientras que las tasas de erosión hídrica normalmente no llegan a este grado extremo, aunque en muchas regiones semiáridas no perturbadas se erosiona hasta 1 mm/año.

Estas tasas son considerablemente superiores donde la vegetación natural está alterada o aumentan por la formación de cárcavas en las cuales se concentra la erosión.

En términos generales, hay un aumento de la erosión con la precipitación y una disminución en proporción directa con la cubierta vegetal, la cual depende en gran manera de la precipitación, lo que establece una relación compleja de la erosión con la precipitación y la vegetación.

Por otra parte, el movimiento de masas es dominante durante la ampliación de los valles y reducción de las pendientes.

2.3 El modelo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)

Utilizando el modelo matemático A =R.K.LS.C.P; esta ecuación, propuesta por Wischmeier y Smith (1958), estima la erosión hídrica laminar por área, con base en los parámetros:

R: erosividad de la lluvia

K: erodibilidad del suelo

LS: coeficiente de factor topográfico

C: factor de cobertura vegetal

P: factor de prácticas de conservación

A = lámina de erosión por área.

La USLE es una expresión matemática que recoge información sobre parámetros que afectan el desprendimiento, transporte y arrastre o deposición de partículas de suelo por la escorrentía del agua superficial.

Según Wischmeier y Smith (1958; citado por Kirkby y Morgan, 1984), los parámetros (R, K, LS, C y P) son el resultado del mejor modelo de ajuste estadístico, al establecer la independencia de las variables en cada subgrupo de variables; ya que miden la correlación de los efectos en las localidades donde se aplica el modelo.

Originalmente estos parámetros se establecieron con unidades físicas básicas. Por eso, en nuestro medio donde la falta de información es característica, deben establecerse en base a la cantidad y tipo de información existente, así como por el entendimiento de los procesos naturales que gobiernan la erosión.

La USLE en alguna medida ha sido utilizada en 6 subcuencas tributarias del río Lempa; los resultados obtenidos han estimado valores de erosión elevados, fallando posiblemente el cálculo del factor "R" (Bueno, Hernández, Lazo; 1990). Asimismo, estos autores recomiendan continuar trabajando con

este modelo, para poder establecer cómo la erosión disminuye la productividad de los cultivos.

Originalmente, los parámetros se calcularon así:

2.2.1 Factor de Erosividad de la Lluvia (R).

Wischmeier (1958; citado por Kirkby y Morgan, 1984) comprobó que, al mantener constantes los factores a excepción de la lluvia, las pérdidas de suelo son proporcionales a un parámetro que mide su erosividad, EI, que se define como el producto de la energía total de la lluvia (E) por su Intensidad Máxima para 30 minutos (I30 expresado en mm/hora). Asimismo, el promedio total anual de EI para cada tormenta es el Indice de Erosividad de la lluvia para esa localidad y se denota por "R".

La intensidad media a 30 minutos indica los índices pico prolongados de remoción y escorrentía, por lo que EI es la interacción estadística de la energía total y la intensidad pico para cada lluvia en particular. Asimismo, se establece que la energía de la lluvia es función del número y cantidad de los componentes de intensidad.

Según Wischmeier y Smith (1958; citado por Kirkby y Morgan, 1984) es de suponer que, el tamaño promedio de gotas y la velocidad de caída se incrementan con la intensidad; como la energía de la lluvia está directamente relacionada con la intensidad y, la energía de una masa en movimiento es proporcional a la velocidad al cuadrado, la relación se expresa por:

$$e = 916 + 331 \log10\ i \qquad (1)$$

Donde e = energía cinética (MJ/ha mm)
i = log. de la intensidad (mm/hora).

Lo que muestra que la erosividad se obtiene del análisis de la energía total o de los componentes de intensidad de las lluvias en una localidad.

Según Wischmeier y Smith (1958; citado por Kirkby y Morgan, 1984) la acumulación de energía de la lluvia, guarda relación lineal con la pérdida de suelo; por lo que los diferentes valores son aditivos y la suma de EI para un período es una medida numérica del potencial erosivo de la lluvia para ese período.

El planteamiento anterior permite establecer una observación fundamental, ya que dicha relación no es lineal, si las erosividades de las lluvias sucesivas pueden acumularse y por consecuencia sus energías. En este caso la erodibilidad del suelo va a cambiar durante todo el desarrollo del proceso porque las partes superficiales sufren acumulación de energía, la cual puede dar un cambio en las características estructurales de los horizontes superficiales si se supone que se suceden de manera homogénea (perfil de suelo poco diferenciado) y así sólo sería una modificación de la resistencia del material durante el tiempo.

Por otro lado si hay cambio en las características estructurales superficiales (ya que la erosión elimina las capas superficiales) inicialmente diferentes, no es posible

que se mantenga una erodibilidad constante, por consecuencia el coeficiente K es muy heterogéneo.

Wischmeier y Smith (1958; citado por Kirkby y Morgan, 1984) establecieron en Estados Unidos, valores R basados en registros de lluvia promedio para 22 años, dada la tendencia cíclica de éstos fenómenos. Adoptaron un valor crítico, en el cual las lluvias con menos de 1.27 mm, separadas de otro evento, por más de 6 horas fueron omitidas para el cálculo R, a menos que 0.64 mm cayeran en 15 minutos, ya que el EI para dichas lluvias es muy bajo y no tiene significancia práctica en el porcentaje mensual de EI. Con este valor crítico (1.27 mm), Dissmeyer y Foster (1984); disminuyeron los costos de analizar datos de lluvia para 4000 estaciones, en los EE. UU. Sin embargo, no se ha comprobado de manera experimental, en regiones tropicales.

Este parámetro no debe considerarse sólo como indicador de energía, ya que ésta por sí misma, no indica el potencial erosivo de la lluvia, sólo indica el volumen de agua y escorrentía. Así, algunas lluvias prolongadas leves pueden tener igual energía que lluvias cortas con mayor intensidad.

Debe mencionarse, como limitante del desarrollo de R que, según la teoría, una intensidad débil por largo tiempo sea igual a una intensidad fuerte en menor tiempo. En la práctica, las condiciones de humectación son totalmente diferentes; se puede presentar un suelo totalmente saturado que no se erosiona en una pendiente débil, ya que la lámina de sobresaturación hídrica intercepta la energía cinética de la

lluvia por su propio peso o, cuando el suelo está inicialmente seco y los poros llenos de aire, su conductividad hidraúlica será menor que la de la lluvia, lo que provoca fuerte escurrimiento con gran destrucción de los agregados por la energía cinética de la lluvia.

A nivel nacional, el cuadro 1 muestra cómo la intensidad de las lluvias incide directamente en la erosión de los suelos.

Cuadro 1. Clasificación de las tormentas erosivas considerando la intensidad de 30 minutos de mayor precipitación para 10 años en El Salvador, período 1967-1976.

RANGO (min)	No. LLUVIAS EROSIVAS	%
0-10	46	8.6
11-20	119	22.4
21-30	161	30.3
31-40	100	18.8
41-50	44	8.3
51-60	33	6.2
61-70	10	1.9
71-80	9	1.7
81-90	4	0.7
91-100	4	0.7
101-110	2	0.4

Fuente: Heymans, 1977. Limitaciones de la EUPS. Texcoco, México.

Del cuadro anterior se observa que un 61.2% de las lluvias erosivas tienen una duración entre 1 y 30 minutos, por lo que el factor de erosividad de la lluvia (R) puede hacer un buen estimado de cómo afecta la lluvia a la erosión en la cuenca.

2.2.2 Factor de Erodibilidad del Suelo (K)

Es una descripción cuantitativa de la erodibilidad inherente de un suelo y refleja el hecho que diferentes suelos se erosionan a diferentes tasas cuando los demás factores que afectan la erosión se mantienen constantes.

El factor K puede medirse experimentalmente para un suelo en particular y, es la tasa de pérdida de suelo por unidad de índice de erosión, medido en parcela experimental, la cual definen arbitrariamente Dissmeyer y Foster (1984) como una unidad de suelo de 22.13 mts de longitud, con pendiente uniforme del 9%, cultivo de barbecho y labrada a favor de la pendiente. Se entiende por barbecho aquella tierra que ha sido labrada y mantenida libre de vegetación por más de 2 años.

Durante el período de medición de la pérdida de suelo, la unidad experimental es arada y preparada con labores agronómicas convencionales para el cultivo de maiz y se ara cuando sea necesario, para prevenir el crecimiento de plantas y el encostramiento de la superficie. También, para calcular K, dado que se mantienen constantes todos los factores, éste resulta de dividir A entre EI.

Asimismo, K puede calcularse según el Nomograma de Erodibilidad del Suelo (Fig. 2A; Wischmeier y Smith, 1978; citado por Dissmeyer y Foster, 1984) que no es más que la solución matemática de la ecuación (2) que describe las proporciones en las cuales, la arena, limo y fracciones de arcilla están combinadas en un suelo determinado.

$$K = 2.1\ M1.14\ (10-6)(12-a)+0.0325(b-2)+0.025(c-3) \qquad (2)$$

donde: M = parámetro de tamaño de partícula
a = materia orgánica (%)
b = código de estructura del suelo
c = clase de permeabilidad del perfil

La intersección de los porcentajes seleccionados, calcula el valor de M en la escala horizontal del Nomograma.

El uso del Nomograma permite obtener valores bastante precisos del factor K, cuando no exista información experimental para dicho propósito; porque a partir de una relación matemática se puede establecer la erodibilidad del suelo, pero debe utilizarse con mucha cautela en el caso de horizontes muy heterogéneos, que presentan gran variabilidad en las diferentes características texturales y estructurales del suelo, para evitar mucha dispersión en los resultados.

2.2.3 Factor de Coeficiente Topográfico (LS)

En los trópicos, gran número de pequeños agricultores cultivan las colinas de las tierras altas y laderas de las montañas; ya que, las llanuras más fértiles y los valles aluviales están ocupadas por grandes explotaciones y plantaciones, quedando los terrenos más accidentados circundantes para los pequeños agricultores de subsistencia, con sistemas de producción agrícola tradicionales en los cuales el suelo no puede recuperar su fertilidad y estructura, con lo que la erosión arrastra rápidamente la capa de suelo más fertil (Sheng, 198).

Lo anterior, asociado con la alta intensidad de las lluvias, el exceso de escorrentía superficial y la

vulnerabilidad de muchos suelos al agente erosivo, acentúan los problemas causados por la erosión en las laderas cultivadas del trópico (Sheng, T. y Stennet, H., 1975; citado por Sibilia, 1988).

Dada la importancia de la pendiente en la erosión de los suelos, la USLE recoge los efectos de la longitud y el gradiente de la pendiente, representándolos como L y S, respectivamente; sin embargo, a menudo se evalúan como un factor topográfico único, LS.

Según Wischmeier y Smith (1958; citado por Dissmeyer y Foster, 1984), la longitud de la pendiente se define como la distancia desde el punto de origen del flujo sobre la superficie hasta el punto donde la pendiente disminuye lo bastante como para que ocurra la deposición o la escorrentía entra a un canal definido, que puede ser parte de una red de drenaje a un canal construído, mientras que el gradiente de la pendiente es el campo o segmento con igual pendiente, expresado como porcentaje.

El desarrollo de la EUPS se basó en la longitud de una parcela estándar de 22.13 metros (Wischmeir y Smith, 1965; citado por Kirkby y Morgan, 1984); por lo que el factor de longitud de pendiente se define como:

$$L = (x/22.13)m \qquad (3)$$

donde L = factor de longitud de la pendiente
x = longitud de la pendiente (metros)
m = exponente

Las recomendaciones actuales (Wischmeier y Smith, 1978; citado por Kirkby y Morgan, 1984) para el exponente m son: m = 0.5 si S ≥ 5%; 0.4 si S = 3.5-4.0%; 0.3 si S = 1-3 % y 0.2 con gradiente uniformes de menos de 1%.

Asimismo, Smith y Wischmeier (1957; citado por Kirkby y Morgan; 1984) determinaron que la pérdida de suelo estaba correlacionada con una descripción parabólica del efecto del gradiente de pendiente. Al normalizar esta ecuación con una pendiente de parcela estándar de 9%, resulta una descripción del factor de pendiente:

$$S = \frac{0.43 + 0.30s + 0.043s2}{6.613} \qquad (4)$$

donde S = gradiente (%)
s = factor de gradiente de pendiente.

Así, los valores de LS se computan a partir de:

$$LS = (x/22.13)m(0.065 + 0.045s + 0.0065s2) \qquad (5)$$

en la cual los términos se han definido previamente.

Asimismo, Foster y Wischmeier (1974) estimaron la pérdida de suelo en perfiles complejos y proporcionaron una metodología para evaluar LS en pendientes irregulares, divididas en n segmentos uniformes en grado y tipo de suelo.

Así, la lámina de erosión se calcula utilizando:

$$A = RKCP \left[\frac{\sum_{j=1}^{n} (Sj\ xj^{m+1} - Sj\ xj-1^{m+1})}{xe\ (22.13)m} \right] \quad (6)$$

donde: xj = Distancia desde la cima de la pendiente hasta el extremo inferior del segmento j-ésimo
xj-1= Longitud de pendiente desde la cima hasta el extremo superior del segmento j-ésimo
xe = Longitud total de la pendiente
Sj = Valor del factor pendiente para el segmento j
RKCP= ya definidos

Wischmeier (1974; citado por Kirkby y Morgan, 1984) presentó una solución tabular simplificada; y una nueva fórmula que incluye variaciones, a medida que se progresa hacia abajo de los valores de K encontrados. También es razonable tratar un cambio en el factor de cultivo (C), si el uso de la tierra cambia con la pendiente.

2.2.4 Factor de Coeficiente de Cultivo (C)

La extracción de madera, el fuego, el pastoreo, la preparación mecánica de las tierras, la vida silvestre y otras actividades disturban y destruyen la cobertura vegetal, dejando el suelo expuesto a la energia erosiva de la lluvia y la escorrentia; así, un suelo no disturbado y con cobertura forestal completa, no experimenta mucha escorrentía superficial, ni experimenta erosión laminar o en surcos (Dissmeyer y Foster, 1984).

Así, según Goujon (1968) un terreno cubierto de una vegetación permanente, pastizales o bosques, no presenta

prácticamente huellas de la erosión, si éstos se encuentran en una explotación sostenible. Puede existir escorrentia si la pendiente es fuerte, pero las pérdidas en tierra son nulas, porque ésta es mantenida en el sitio por las raices de las plantas y sobre todo, porque la energia cinética de las gotas de lluvia es amortiguada por la vegetación.

Por esto, el factor C representa la relación de pérdida de suelo a partir de una condición especifica de cultivo o cobertura vegetal comparada con dicha pèrdida a partir de un estado de labranza y barbecho continuo para iguales condiciones de suelo, pendiente y precipitación.

Los valores de C se asignan de acuerdo al tipo y cantidad de cobertura vegetal, teniéndose un máximo de 1 para suelo desnudo y un minimo de cero para cobertura total.

Wischmeier (1958; citado por Dissmeyer y Foster; 1984) y Wischmeier y Smith (1957; citado por Dissmeyer y Foster; 1984) desarrollaron un sistema para evaluar un factor C compuesto, producto de valores de cada una de las variables secundarias que intervienen en una situación de cobertura en particular, durante un periodo de tiempo determinado.

Wischmeier (1975; citado por Dissmeyer y Foster; 1984) identificó tres subfactores principales: (I) sombra, (II) cobertura superficial y (III) efectos bajo la superficie y las subvariables que los afectan como: efectos de desprendimiento de las particulas de suelo, rugosidad, uso residual de la tierra, incorporación de residuos de cosecha, cantidad de suelo desnudo o tierra cubierta, sombra (canopia),

reconsolidación del suelo, contenido de materia orgánica, raices finas, efecto de mezcla residual, almacenamiento in situ, pasos y labranza de contorno.

Otros autores (Roose, 1975) han desarrollado coeficientes del factor C para caracterizar o simular el factor de cultivo que se adaptan más a situaciones de uso tradicional de la tierra (cuadro 3) o, indices para evaluar detalladamente dicha cobertura (Tucker, 1977; Huete, 1988; Cyr et al, 1992; citados por Anys, 1992).

Cuadro 2. El factor de cobertura vegetal y técnicas de cultivo (C) en Africa Occidental.

Uso de la Tierra	Factor C (*)
Suelo desnudo (urbano)	1.000
Cauce de rio	1.000
Tabaco-maiz (sin prácticas)	0.700
Caña de azucar (siembra/establ.)	0.500
Sabanas y pastos	0.150
Café-frutales	0.125
Forestal	0.015

Fuente: Roose, 1977 (citado por Kirkby y Morgan, 1984)
Modificado (1992)

(*) Valor promedio anual

2.2.5 Factor de Prácticas de Conservación (P)

Según Kirkby y Morgan (1984), el valor de P es la proporción de pérdida de suelo cuando se hace uso de alguna práctica especifica, comparada con las pérdidas cuando se cultiva en las laderas de las colinas.

Los tratamientos antierosivos logran una reducción más o menos fuerte de la erosión y son necesarios cada vez que las pérdidas de tierra sobrepasen cierto valor, variable con la naturaleza del suelo y determinado en función de la pedogénesis (Goujon, 1968).

Según Wischmeier y Smith (1973; citado por Kirkby y Morgan, 1984) la labranza de conservación, que incluye el cultivo en contorno, cultivo en franjas en contorno y formación de terrazas; la rotación de cultivos, los tratamientos de fertilización y la retención de los residuos, son métodos importantes en el control de la erosión, que se incluyen en este factor.

Dentro de cierto tipo de práctica, el factor P es el más efectivo para una escala de pendiente determinada y sus valores aumentan con la pendiente. Así, cuando la pendiente disminuye por debajo del 2%, el valor de P aumenta por el efecto ejercido por la práctica. comparado con el cultivo sin práctica (cultivo en ladera de colina), tal como lo muestra el cuadro 3.

Cuadro 3. Factor de Método de control de la erosión (P)

Pend. (%)	Cult. en Contorno	Cult. en franjas y surcos irrigados	Terrazas
1-2	0.60	0.30	0.12
3-8	0.50	0.25	0.10
9-12	0.60	0.30	0.12
13-16	0.70	0.35	0.14
17-20	0.80	0.40	0.16
21-25	0.90	0.45	0.18

Fuente: Wischmeier y Smith (1978: citado por Kirkb/ y Morgan, 1984).

2.4 Utilización de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para evaluar los recursos naturales.

Actualmente, la necesidad de conocer el estado de los recursos naturales, ha llevado al hombre al diseño de herramientas que permitan establecer rápidamente los cambios más importantes que éstos experimentan, lo cual antiguamente se establecia de una forma manual, que consumia gran cantidad de tiempo y esfuerzos (Benson, 1990).

Asi, con el aumento de la capacidad de las memorias artificiales se abren nuevas posibilidades de análisis y el hombre hace uso de la tecnologia moderna para poder utilizar la información de una manera general y evaluar las implicaciones que tendrian cambios drásticos en el patrón de uso a que están sometidos los recursos (Wertz, 1990).

Los SIG son una herramienta que permite obtener, aún desde áreas remotas; informaciones actualizadas georeferenciadas que ayuden a la comprensión cientifica de los procesos de la

tierra y la ordenación racional del medio ambiente a diversos niveles, para asi inferir acerca de los cambios que puedan sufrir los recursos como consecuencia directa del manejo o de eventos naturales catastróficos (Wertz, 1990).

Un SIG ofrece la ventaja que los datos georeferenciados puede ser superpuestos para analizar sus interacciones.

A nivel de planificación, se han utilizado para establecer lineamientos de manejo de áreas homogéneas en cuanto a factores biofisicos, económicos o sociales; asi como para predecir con exactitud estadistica, cambios hipotéticos similares a los que puedan darse en la naturaleza (Ludeke, Maggio y Reid; 1990).

Es asi como los SIG explican de forma matemática, las estrechas relaciones espaciales que existan entre diferentes variables dependientes o independientes y un evento critico (Ludeke, Maggio y Reid; 1990).

En relación a los estudios realizados con SIG, para investigar sobre el deterioro de los recursos naturales, Nualchawee (1985, citado por Ludeke, Maggio y Reid; 1990); estableció un modelo de medición de los cambios en la cobertura vegetal, causados por la deforestación en el norte de Tailandia, por medio de un SIG.

Mientras que Ludeke, Maggio y Reid (1990) establecieron un modelo de regresión logistica para establecer la deforestación causada por la proximidad del factor humano, por medio de un SIG.

Para el estudio de la erosión, Anys et al (1991) realizaron una estimación de la erosión en Marruecos, con la utilización de sensores remotos y un SIG, donde encontraron que el análisis espacial y el uso de sensores remotos proveen información unica y muy adecuada para la estimación de la erosión, en escalas entre 1: 50,000 a 1: 200,000

3 LOCALIZACION Y DESCRIPCION DE FACTORES BIOFISICOS DE LA CUENCA DEL RIO LAS CAÑAS

3.1 Ubicación y Superficie

La cuenca se localiza al norte del Lago de Ilopango, nororiente de la ciudad de San Salvador, del mismo departamento; en los cuadrantes 2357 II y 2357 I, elaborados por el Instituto Geográfico Nacional. Posee un área de 76.06 km2. y un perimetro de 615.3 kms (Fig. 1).

3.2 Gemorfologia y Materiales Parentales

La geologia de la cuenca muestra que ésta se divide en una provincia geológica mayor y dos menores, que presentan fallas que van del oeste al este y que la zona ha estado y está aún sujeta a un arqueo geoanticlinal.

Además, se observan gruesos depósitos de cenizas (de hasta 80 m), con baja permeabilidad, bajo rendimiento de agua y de origen volcánico que subyacen en la mayor parte de la cuenca, producto de la "Formación de San Salvador" (Holoceno y Pleistoceno).

Las capas más antiguas de ceniza son diferentes quimica y mineralógicamente y están parcialmente litificadas formando tobas, en una matriz arenosa fina pomicitica (Ignimbrita), débilmente indurada, permeable, con composición quimica y materiales diversos.

AMERICA CENTRAL Y EL CARIBE

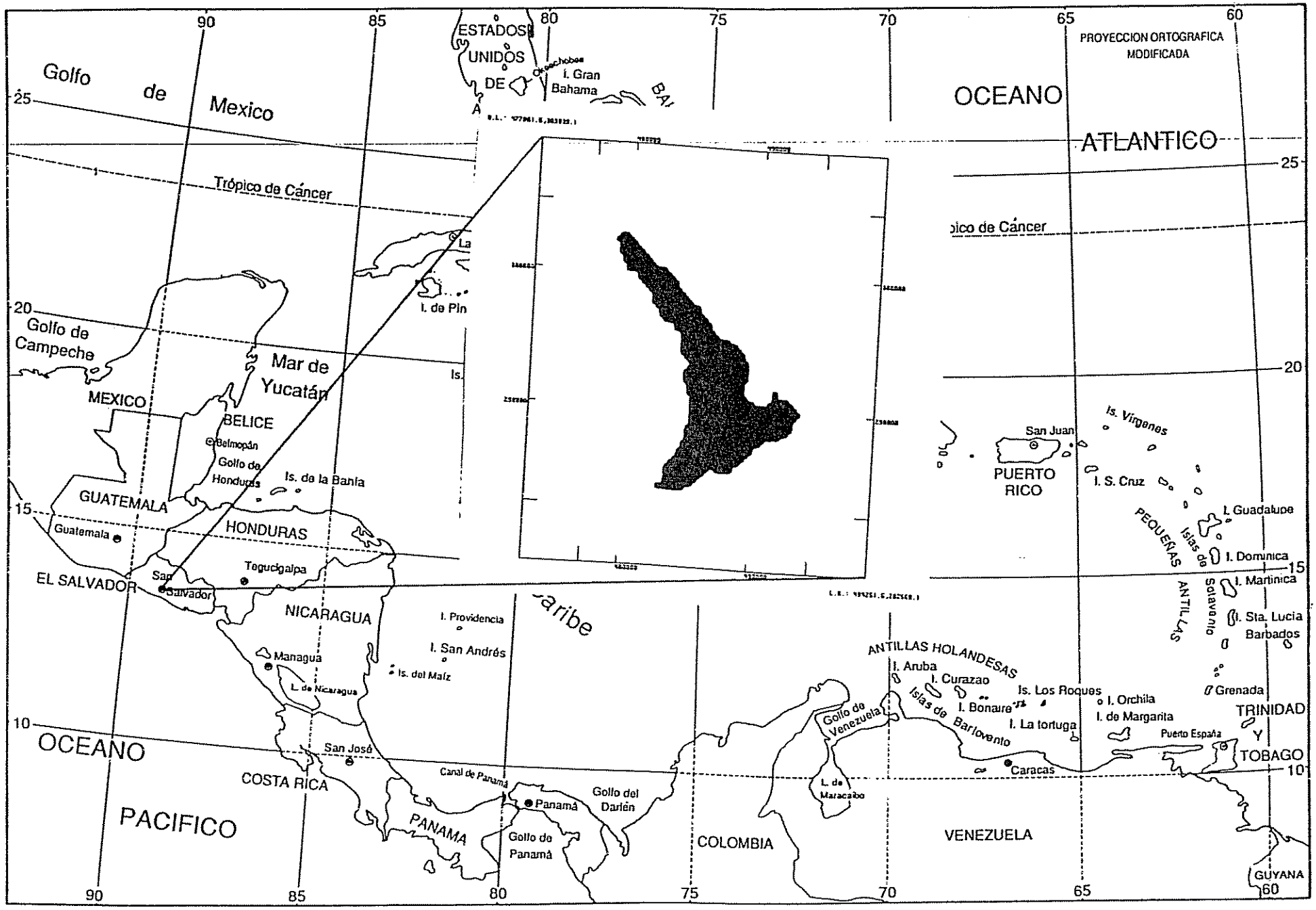


Fig. 1. Localización del area de estudio. Cuenca del río Las Cañas.

Otros materiales originales son cenizas pomíticas ácidas (producto de la caldera de Ilopango), ricas en potasio, permeables, altamente retentivas de agua (especialmente si las cenizas son arenas finas o limo grueso). Forman una capa de unos 50 mts de espesor, con texturas arenosas y limosas, con distribución dacitica (materiales redistribuidos por erosión fluvial posterior y deposición).

Otro grupo de materiales son, rocas basálticas y andesiticas (Plioceno) bien consolidadas, no muy permeables, débilmente fracturadas, que no forman buenos acuíferos.

La inestabilidad recurrente de la región es considerable, dados los frecuentes sismos y temblores, que pueden propiciar el movimiento de masas. Registros muestran que la zona está dentro de la región de actividad más severa; pudiendo esperarse terremotos de poca profundidad (10 Km) con fuerzas mayores a 8 (Seiberg Mercalli), experimentados en muchas ocasiones (Schmidt Thome, 1975; citado por ODA, 1981). Segun Weber (1978: citado por ODA, 1981) entre 1576 y 1965, San Salvador ha sido dañado o destruido al menos 11 veces.

Segun Collinet (1992) lo más importante de mencionar es, la heterogeneidad vertical de los materiales que componen los suelos y la presencia de suelos enterrados, los que se convierten en nuevos materiales parentales, difíciles de diferenciar al evaluar la profundidad y efectos de la erosión. Asimismo, respecto a la geomorfologia, el mismo autor presupone que las fuerzas naturales del clima que han formado el paisaje actual, actuarán con igual intensidad, pero sobre

materiales más inestables (suelos enterrados de ceniza) y no sobre materiales originales (rocas), por lo que es de esperarse más daño y cambios más drásticos en la formación del paisaje.

3.3 Suelos

Pertenecen al orden Andosol, sub-orden Vitric Andosols de la clasificación FAO; orden Inceptisoles, grandes grupos Vitrandepts o Eutrandepts, clasificación USDA y Andosoles eutricos o dystricos, clasificación francesa.

Debe mencionarse que del área total del pais, un 20.8% (4340 km^2) de los suelos son Andisoles, de los cuales un 22% se encuentran en terrenos accidentados. Esto es importante, dadas las características propias de estos suelos, que poseen una porosidad total promedio de 674 (mm de agua/100 cm de suelo), muy superior a otros tipos de suelos (ej. Vertisoles = 344) lo cual les proporciona gran retención de agua y caracteristicas de buena aireación.

De manera general, estos suelos cuando están bastante evolucionados y no degradados por la actividad humana, poseen de buenas a excelentes características de fertilidad tanto fisica como quimica.

Sus caracteristicas más importantes para la agricultura son: homogeneidad sobre una gran profundidad, buen drenaje interno, ya que no poseen horizontes muy diferenciados por

caracteristicas de textura, estructura, compactación o porosidad que les permitan acumular agua.

Asimismo, poseen las mejores condiciones de porosidad (diámetro y regularidad) que permite ascenciones de los flujos capilares con fuerte caudal desde las reservas hidricas profundas hasta la superficie.

Sus componentes arcillosos están constituidos de minerales criptocristalinos o amorfos (geles alofánicos de tipo aluminio-silicato hidratado), por lo que sus superficies especificas se vuelven especialmente importantes en la retención de agua, absorción y protección de la materia orgánica y la fijación de iones.

Las posibilidades de retención de agua son muy altas (hasta 300 mm en un metro de suelo) a capacidad de campo.

Los geles alofánicos absorben los ácidos húmicos en la forma de un complejo orgánico-mineral muy estable en el tiempo, o sea que bajo condiciones normales de conservación, cantidades importantes de materia orgánica se incorporan profundamente, lo que les otorgan sus colores oscuros.

Por ultimo, esta fuerte tendencia de absorción está relacionada con los cationes y aniones del complejo de intercambio. Sin embargo, existen diferencias sensibles de saturación del complejo y de intensidad de fijación de los iones con relación a la naturaleza de los geles alofánicos, de acuerdo con el contenido de aluminio, siendo los más decisivos para la fertilidad, los que poseen menor cantidad de este elemento.

3.4 Clima

La zona pertenece al clima tropical semihúmedo, caracterizado por estaciones húmeda y seca bien definidas, con cuatro a seis meses de sequia (mes seco: <60 mm).

En la cuenca, las precipitaciones medias anuales alcanzan 1900 mm en el sur, disminuyendo hasta 1700 en el norte. Cerca del 90% de las lluvias caen entre mayo y octubre, pero algunas veces hay disminución de las lluvias en julio y agosto, por la presencia de la canicula, caracteristica en el Itsmo centroameriano.

Las tormentas son frecuentes, con intensidades que pueden superar los 70 mm/h en 30 minutos, con recurrencia de 2 años.

Las temperaturas son más o menos constantes durante todo el año, con máximas de 27o C en el periodo de marzo a mayo, y 25. C para el resto del año.

La humedad relativa que alcanza 85% durante la estación húmeda, baja hasta 60% durante la estación seca.

3.5 Uso de la tierra

Excluyendo el área urbana (17%), el resto del área de la cuenca es utilizada para cultivos, pastos y bosques en recuperación. La proporción de tierra agricola disminuye anualmente por el desarrollo de nuevos asentamientos y zonas industriales, asi como por la erosión de los suelos.

Dado el alarmante proceso erosivo en que se encuentra la cuenca, actualmente la CEL desarrolla un Plan de Rehabilitación de la Cuenca, con el objetivo de organizar el uso del suelo y elevar el nivel de vida de los productores del área. Entre las actividades más importantes que se desarrollan se pueden mencionar: introducción de prácticas de conservación entre los agricultores (acequias de infiltración, barreras de piña y siembra en contorno); construcción de obras mecánicas (muros gavionados y palos-pique); desarrollo de viveros forestales e introducción de prácticas agrosilvopastoriles y, desarrollo de actividades de bienestar social y capacitación en las comunidades.

Los cultivos predominantes en la zona son:

a)Cultivos Permanentes:

Ocupan 21% del área y predominan Café y frutales que se cultivan en suelos de cenizas volcánicas profundos, por su habilidad para retener agua durante la estación seca.

El café se produce en grandes fincas y lotes de pequeños productores, quienes venden su producción fresca a los más grandes, que se encargan del beneficiado. Igualmente, las frutas se producen en uno o dos árboles dentro de las parcelas de los pequeños productores quienes venden al detalle.

El café es considerado un cultivo conservacionista tradicional, ya que se establece a corta distancia, con sombra ligera (de Inga spp y Gliricidia sepium), cuyos restos de poda

proveen un mulch superficial. Además, el replantado de árboles defectuosos es anual, lo que mantiene una cubierta protectora constante sobre el suelo.

Los frutales, en general, se cultivan de igual manera que el café (presencia de mulch) por lo que no deben considerarse como gran fuente de pérdida de suelo.

b)Caña de Azúcar:

Con un 14% del área, se cultiva en zonas arenosas. Antiguamente, se cultivó en suelos de ceniza arenosa con mucha pendiente, pero fue rápidamente reemplazada por los desarrollos urbanos.

Actualmente, se siembra con técnicas mecánicas, pero se cosecha a mano. Ya establecido, se considera un cultivo conservacionista, porque se siembra contra la pendiente, tiene cobertura densa y produce mucha basura o mulch (si no es quemada). Después de la cosecha, provee buena protección a las pendientes moderadas, donde se establece.

Las labores de siembra al replantar cada 5 ó 6 años pueden producir severa erosión en rigulas; pero algunos productores utilizan sistemas de bordas que reducen la pérdida de suelo en tierras de poca pendiente.

c)Granos Básicos y Tabaco:

El área sembrada es de 14%, siendo el maíz o combinaciones maíz/frijol los más importantes en esta categoría. Este sistema provee poca protección al suelo en épocas críticas del

año, ya que las prácticas se realizan al inicio de las lluvias, con el suelo desnudo y arado de bueyes en varios pases. La fertilización se efectua después de la germinación y en algunos casos no se aplican pesticidas. Es un sistema de cultivo muy erosivo.

Por otro lado, el tabaco se transplanta en agosto/septiembre, después del maiz. La mayor parte sembrada se hace en contrato con la compañia tabacalera, cuyo sistema de extensión agricola promueve la siembra en contorno.

d)Sabanas y pastos:

Son áreas más o menos naturales (20%), cultivadas en suelos arcillosos que producen pastos de baja calidad, de los que una pequeña proporción se conserva como heno o ensilaje. Durante la época seca, el ganado pastorea toda la cobertura, dejando la tierra susceptible a la erosión superficial hasta el inicio de las lluvias.

e)Forestal:

También, un 14% del área son selvas en galerias forestales, situadas en los valles o cerca de las quebradas. Según se mencionó, la CEL trata de introducir sistemas agroforestales, iniciando con procesos de establecimiento de viveros y ensayos forestales para la posterior plantación de las especies más prospectivas.

4 MATERIALES Y METODOS

4.1 Información Disponible.

-Mapas de Levantamiento de Suelos, Topográfico y de Uso Actual de la tierra de la cuenca del rio Las Cañas. Esc 1:50000. Fuente: CEL, 1990

-Imagen Landsat Tematic Mapper/julio-88. Path 19, Row 51. Fuente: EROS Data Center, USA.

-Datos de Intensidades máximas anuales y precipitación total anual. Estaciones: Aeropuerto, Apopa y Matriz; El Salvador. Años 1973-1977.

4.2 Materiales

-Software: ERDAS, versión 7.5

Idrisi, versión 4.0

-La fase de elaboración y análisis de mapas se llevó a cabo en el Centro de Cómputo del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, C.R.

4.3 Metodologia

La investigación se dividió en tres fases:

I Recolección de información y recorrido de campo.

Durante esta fase, se recolectó información referente a erosión, al modelo USLE y SIG. Además se actualizó la información obtenida de mapas, con visitas de comprobación en el campo.

II Elaboración de mapas.

Por medio de digitalización, con el software ERDAS, versión 7.5, se elaboraron mapas correspondientes en la USLE a los factores R, K, LS y CP, de la manera siguiene

a)Factor R: Debido a la existencia de un minimo de información confiable, se estableció una zonificación de EI, referida a una distribución proporcional espacial, segun el valor relativo de cada unidad. Así, para cada estación se ingresó en la Tabla de Energia Cinética de la lluvia (Fig. 1A), el valor de intensidad máxima anual absoluta (en mm/hora); el resultado se multiplicó por el promedio de precipitación anual (1800 mm), de un año representativo y por el valor para la lluvia por 30 minutos, con lo que se obtiene el valor de la Erosividad Anual (MJ mm/ha h a) en unidades de sistema internacional.

b)Factor K: Con las texturas, obtenidas del Levantamiento de Series de Suelo (Bourne, et al; 1946), se determinaron los umbrales de granulometria, tomando las arcillas como limitantes, ya que en las zonas de suelos jóvenes formados sobre cenizas volcánicas, son las distribuciones

granulométricas que pueden interferir en la estabilidad estructural de los agregados. y más precisamente ciertas proporciones relativas de los limos (Chamayou y Legros, 1989; citado por Collinet, 1992)

Asimismo, en estos suelos las cifras medianas más frecuentes de textura de cada uno de los materiales granulométricos (arena, limo y arcilla) es 33.3%; aproximación que se basa, sin embargo, en informaciones edafológicas de la región, lo cual sirve, no de postulado, pero, a falta de información y como aproximación científicamente autorizada, de nivel de referencia para tratar de interpretar los escasos datos disponibles en las clases texturales, por lo que se considera la tasa de limos constante e igual a 33.3%.

Los valores de contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad se obtuvieron del muestreo de suelos y la leyenda del Mapa de Levantamiento de Suelos, respectivamente.

Los datos correspondientes se ingresaron en el Nomograma de Erodibilidad del Suelo (Fig. 2A), para obtener el K por serie de suelo (pies-ton pulg X 10-2/acre ha a), el cual debe multiplicarse por una constante (0.1317) para asignar el valor K a cada clase (en T ha h/ha MJ mm) en unidades de sistema internacional.

c)Factor LS: A partir del Mapa de Levantamiento Topográfico, se establecieron clases de pendientes en rangos de 10% y se compararon con las clases obtenidas por medio de digitalización de curvas de nivel, para obtener el mapa de

pendientes. Posteriormente, de acuerdo con la metodologia original, se asignó una longitud de pendiente unica de 22.13 metros (Wischmeier; citado por Kirkby y Morgan, 1984), correspondiente con la parcela original, por la falta de un modelo de elevación digital o de un estudio de campo detallado. Asi, con la fórmula del Factor Topográfico (4), se establecen los diferentes valores de LS, para cada rango de pendiente.

d)Factor CP: Simultáneamente, con el software ERDAS con la información proporcionada por la imagen de satélite, se establece una clasificación de uso de la tierra, con base en un programa de clasificación multiespectral primaria, con un análisis de máxima verosimilitud.

En este mapa, se consideran los factores de la erosión que son más influenciados por la actividad humana, y están representados en la USLE por los factores C y P.

Para elaborar el mapa, inicialmente la imagen fue georeferenciada, obteniendo un error menor del 0.1%. Posteriormente se modificó la tabla de frecuencias de los valores espectrales para lograr un mejor contraste. Ya obtenida una imagen con buen contraste visual, se procede a crear un archivo de firmas espectrales, el cual se utiliza para clasificar la imagen.

El resultado final se comparó con una clasificación no supervisada, con la aplicación de un filtro de paso bajo, que elimina las variaciones espectrales de alta frecuencia

espacial y utiliza los poligonos construidos durante la elaboración del archivo de firmas, para hacer un agrupamiento cluster.

Debe mencionarse, que la imagen, correspondiente al mes de julio, proporciona buena información sobre los diferentes cultivos, ya que en esa fecha está totalmente establecido el periodo de lluvias en la zona, los cultivos están desarrollándose y se diferencian claramente.

Con la clasificación de la imagen se establece el uso de la tierra correspondiente a cada área y se asigna el valor C, según el criterio establecido por Roose (1978; citado por Dissmeyer y Foster, 1984; modificado 1992) para estudios realizados en Africa (cuadro 2).

Asimismo, con el mapa resultante de la clasificación, se establece P para cada clase de uso, según el cuadro de prácticas de conservación (cuadro 3) presentado por Wischmeier y Smith (1978; citado por Kirkby y Morgan; 1984) y la información de campo y se asigna, al multiplicar el valor de C por el valor de P para cada práctica.

Posteriormente, esta clasificación se corroboró con el recorrido de campo y se verificó con el Mapa de uso actual disponible, y los resultados fueron satisfactorios.

III: Análisis y modelado de los mapas.

Los mapas finales (R, K, LS y CP) se integran en un SIG, software Idrisi, versión 4.0; utilizando la USLE como función de modelado y el resultado final es el mapa de erosión real.

Inicialmente se combinan los mapas de factor R y K (ya que el sistema sólo tiene capacidad para combinar dos mapas a la vez), multiplicando los valores de las diferentes clases de R y K, respectivamente, con lo que se establece un mapa temporal numero 1, el cual a su vez se combina con el mapa de LS, de igual manera, para establecer un mapa temporal número 2. Finalmente, el mapa temporal 2 se combina con el mapa CP que contiene los factores de cobertura y prácticas de conservación de suelos, con lo que se obtiene el mapa final de clases de erosión (Mapa de A).

Dado que se espera gran variabilidad en los valores resultantes, el mapa final (A) será reclasificado en función de los valores obtenidos y las tasas de erosión encontradas, para así obtener las clases que mejor se adapten al análisis al cual serán sometidos dichos valores.

5 ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

5.1 Los factores de la USLE

5.1.1 Cálculo del factor de erosividad de la lluvia (R)

El cuadro 4 muestra los resultados del valor R obtenidos y el mapa 2 su distribución espacial, los cuales son utilizados en el análisis SIG.

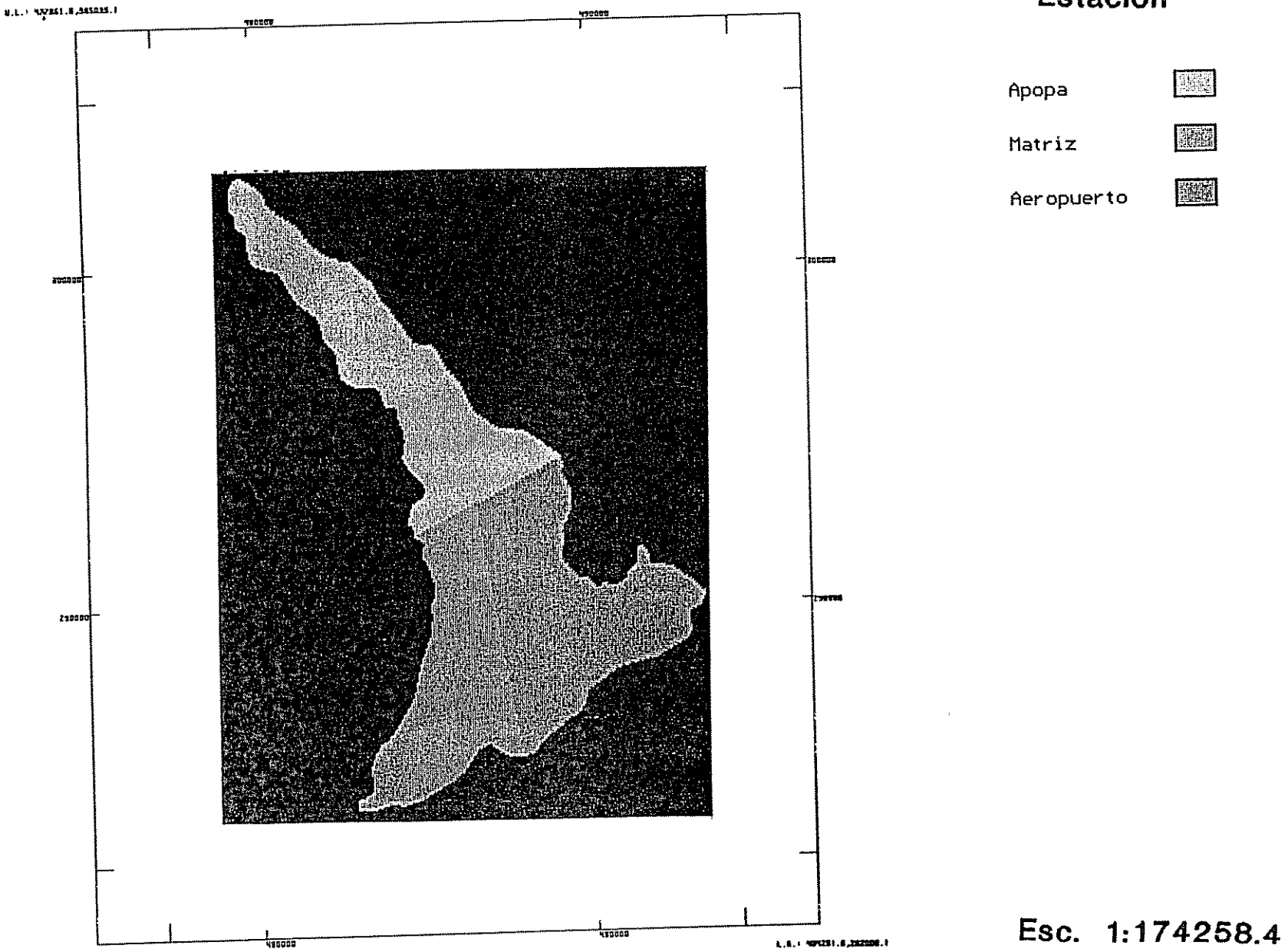
Cuadro 4. Valores del factor R (Erosividad de la lluvia), expresado en MJ mm/ha h a (Sistema Internacional). Cuenca del rio Las Cañas, El Salvador.

Estación	Int Máx. Anual (mm/hora)	E. Cinética kg-m2/m2-m	R
Aeropuerto	72	2.86	1544
Apopa	84	2.93	1582
Matriz	60	2.92	1577

El "R" promedio para la cuenca es 1566, correspondiente a un promedio de 1800 mm de precipitación anual.

A nivel de cuenca, no existe cálculo previo disponible para comparar con el valor obtenido; asimismo, no existen registros de intensidad de lluvia que sirvan para calcular un valor con precisión. Aunque, a nivel nacional existen valores calculados, pero algunos autores (Bueno, Hernandez, Lazo, 1991) establecen que el estimado de la erosión obtenido con este valor es muy alto, fallando posiblemente el cálculo del factor R.

Fig. 2. Mapa de distribución del factor R en la cuenca del río Las Cañas.



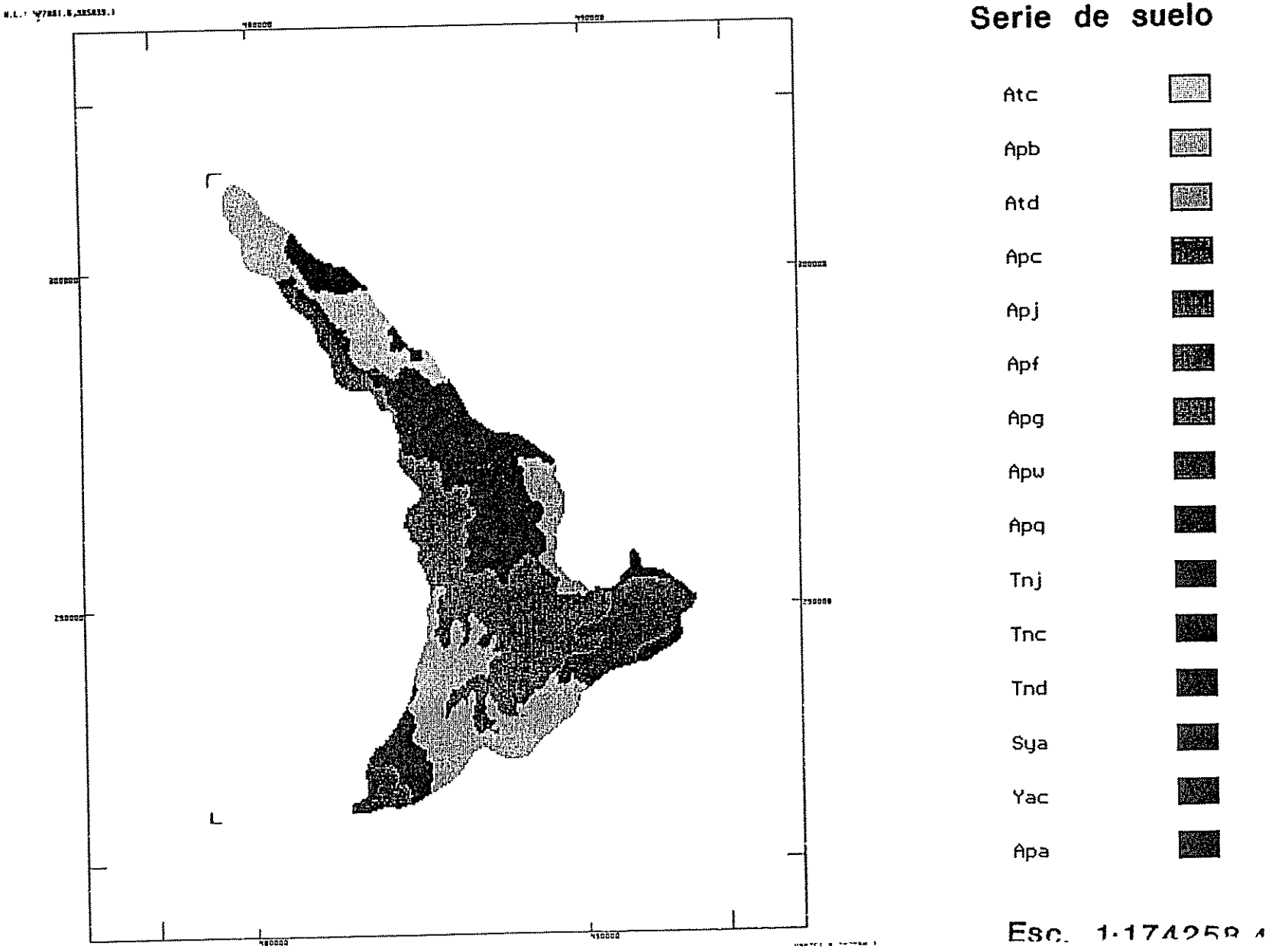
Segun Wischmeier y Smith (citado por Dissmeyer y Foster, 1984), a falta de registros precisos de por lo menos 22 años de duracion, los valores del factor R calculados, deben utilizarse con mucha precaucion, por lo cual, el valor obtenido en la cuenca, se debe considerar como un estimado preliminar, lo cual debe tomarse en cuenta al realizar el análisis integral.

Los valores de R presentados en la distribución espacial del factor R en la cuenca, que se obtuvo a partir de una zonificación de EI de acuerdo con los valores de intensidad obtenidos para cada estación; muestran que el valor mayor corresponde a la parte baja, donde no hay prácticas de conservación ni cobertura vegetal adecuada, lo que permite esperar mayor erosión, mientras que en la parte alta y media y con lluvia menos intensa se espera menor erosión.

5.1.2 Determinación del factor de erodibilidad del suelo (K)

El cuadro 5 muestra la distribución del factor K a lo largo de la cuenca, de la misma manera el Mapa 3 muestra su distribución espacial.

Fig. 3. Mapa de Series de suelo en la cuenca del río Las Cañas.



Cuadro 5 Valores del factor K segun Serie de Suelo (expresado en Sistema internacional) en T ha a/ha MJ mm). Cuenca rio Las Cañas, El Salvador.

Rango	Clasificación*	Clase No.		Serie-suelo	Area(%)
0.0013-0.0262	Bajo	11		Sya	6.6
0.0263-0.0420	Moderado	2	3	Apb Apc	73.23
		4	6	Apf Apj	
		7	8	Apq Apw	
		9	10	Atc Atd	
		12	13	Tnc Tnd	
		14	15	Tnj Yac	
0.0566-0.0723	Alto	1	5	Apa Apg	20.17

(*) Clase Descriptiva (según USDA)

Al igual que R, no existe informacion para comparar con los valores obtenidos, pero del cuadro 3 se deduce que el valor más bajo corresponde a la serie de suelo con mayor contenido de materia orgánica y bajo uso forestal, con café-frutales o pastos (clases 11), área en la cual puede esperarse una erosión baja, ya que los suelos presentan buena cohesión entre sus particulas granulométricas y agregados, lo que garantiza estabilidad y mayor oposición de las particulas de suelo a ser arrastradas.

Los valores más altos (clases 1 y 5) pertenecen a series de suelo ubicadas dentro de la zona urbana o en la transición a urbano, donde hay manejo intenso de grandes volúmenes de tierra, para incorporar nuevas áreas residenciales, lo que posiblemente disminuye la estabilidad de los suelos.

El resto de clases presenta valores intermedios que corresponden a variaciones en contenido de materia orgánica o

diferencias en textura; o también pueden pertenecer a suelos comprendidos en los limites del área urbana ya establecida, donde el suelo tiene cohesión intermedia que le brinda alguna estabilidad.

Asimismo, estos valores coinciden con los valores presentados por el Agricultural Research Service (1975, citado por Kirkby y Morgan, 1984) para texturas y contenidos de materia orgánica determinados, similares a los encontrados en la cuenca.

Debe mencionarse que los valores presentados por este estudio pueden considerarse como una primera aproximación, pero debe mejorarse la informacion correspondiente a texturas para lograr un estimado más preciso.

Se recomienda que a mediano y largo plazo, la erodibilidad del suelo puede disminuirse con la implementación de prácticas de manejo adecuadas, como incorporacion de sistemas agroforestales, que brindan mayor estabilidad estructural al suelo o, con la introducción de medidas biológicas (incorporación de materia vegetal o animal, fresca o seca) que mejoran la estabilidad estructural de los suelos; lo que no puede lograrse con medidas mecánicas que exigen altos costos y tecnicismo de la población para implementarlas; además, numerosos umbrales de degradación están rebasados.

5.1.3 Valores del factor LS calculados.

A continuación se presentan los valores del factor LS encontrados en la cuenca y el Mapa 4 muestra su distribución espacial.

Cuadro 6. Valores del factor LS (Coeficiente de factor topográfico, adimensional). Cuenca del rio Las Cañas, El Salvador.

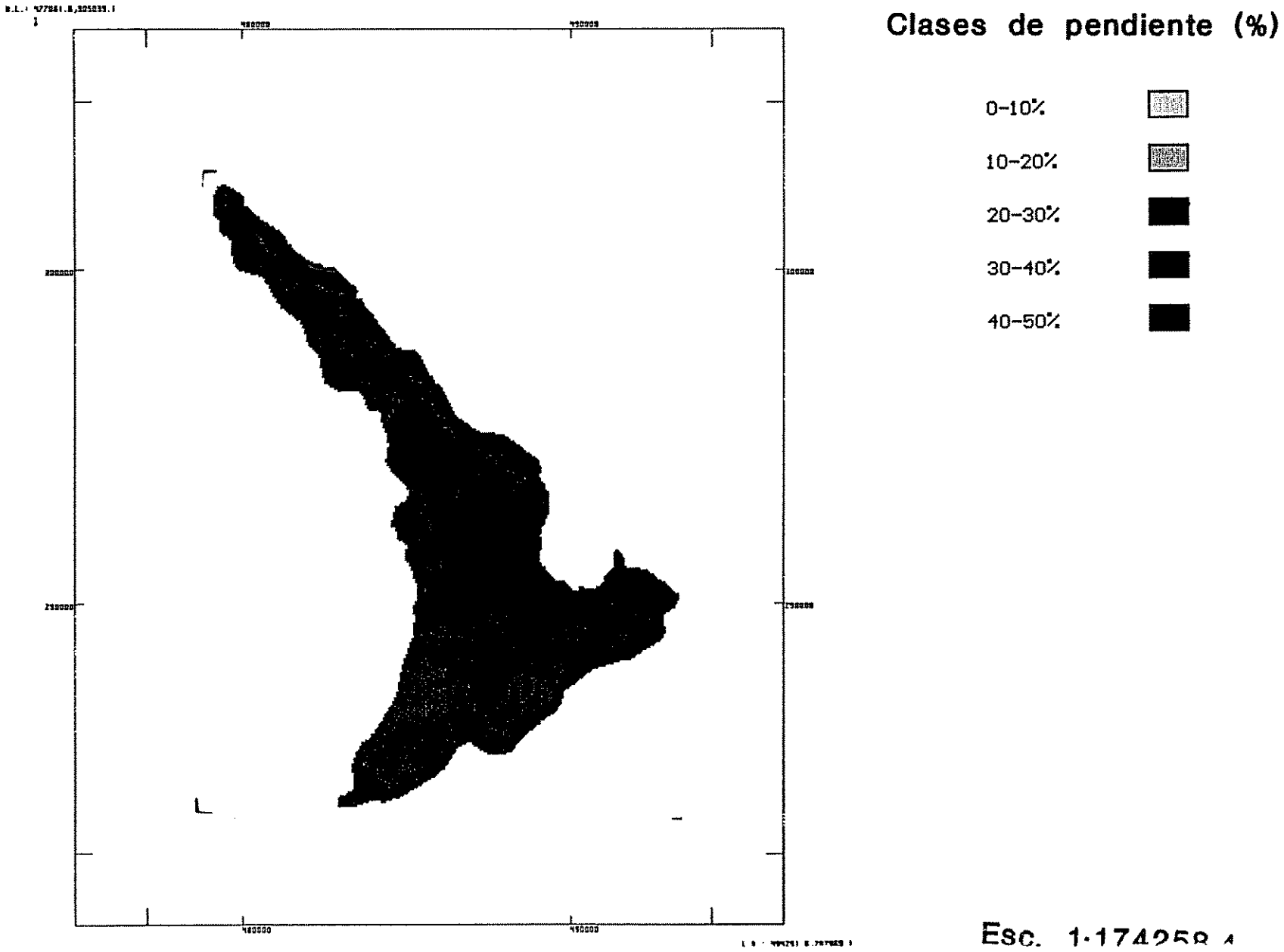
Clase	Rango	Pend. Prom(%)	LS	Area(%)
1	0-10	0.05	6.7	49.22
2	10-20	0.15	7.2	27.27
3	20-30	0.25	7.7	14.65
4	30-40	0.35	8.2	8.38
5	40-50	0.45	8.7	0.49

Ya que el fenómeno de la erosión se ve afectado directamente por la pendiente del terreno, las pérdidas generadas por la clase 1 (entre 0 y 10%), no afectaran drásticamente la cuenca, ya que el 49.22% de la zona se encuentra en una pendiente promedio de 5%, mientras que la clase con mayor pendiente (clase 5, entre 40 y 50%) ocupa solamente un 0.49% del total).

Las clases 2, 3 y 4 (50.3%) si pueden contribuir a generar erosión, porque a este nivel de pendiente (20, 30 y 40%), la erosión representa un factor limitante, incluso para el establecimiento de determinados cultivos.

Se observa entonces, de manera general dos tendencias de erosión potencial, que se ven directamente afectadas por la

Fig. 4. Mapa de clases de pendiente en la cuenca del río Las Cañas.



pendiente; por un lado, las partes norte y sureste donde se espera menor erosión (S<10%) y el resto del área, donde la pendiente es mayor, lo que probablemente traiga mayor erosión (S>10%).

5.1.4 Valores del factor CP calculados

El cuadro 7 y el mapa 5 muestran la distribución porcentual y espacial, respectivamente, de los diferentes usos de la tierra que se presentan en la cuenca, resultado de la clasificación de la imagen TM/88, que servirán como base para el establecimiento de los factores C y P dentro de la USLE.

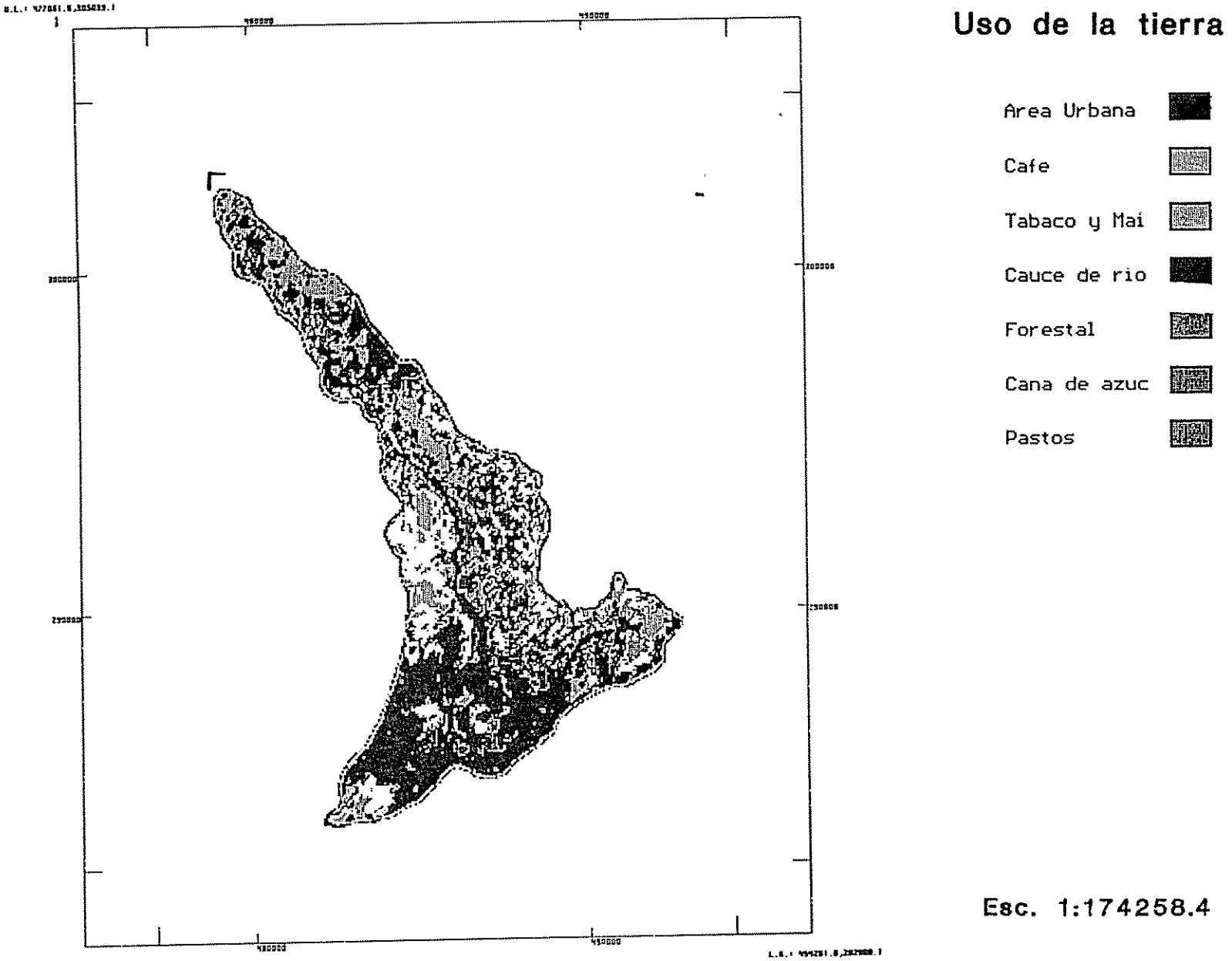
Cuadro 7 Valores del factor CP (factor de cultivo y practicas de conservación). Cuenca rio Las Cañas.

Clase	Tipo de Uso	C	P	Area (%)
1	Cafe-frutales	0.125	1	26.01
2	Caña de azúcar	0.500	1	7.99
3	Cauce de río	1.000	1	7.03
4	Forestal	0.015	1	15.99
5	Sabanas y pastos	0.150	1	19.22
6	Tabaco-maíz	0.700	0.5	18.19
7	Urbano	1.000	1	26.01

Las clases 3 y 7 a las que se les asigna un valor de cobertura 1 (suelo desnudo), incluyen el 33.04% del área; por lo que se espera una lamina de erosión muy alta para esa zona, dado que no existe cobertura, lo que incrementa la escorrentía y el transporte de sedimentos.

Las clases 1, 4 y 5, con 40.78% del total, tienen un valor CP igual o menor que 0.150, lo que se traduce en buena

Fig. 5. Mapa de factor de cultivo y prácticas en la cuenca del río Las Cañas.



cobertura del suelo, que lo protege de la erosividad de la lluvia y la falta de humedad; disminuyendo el riesgo de erosión en la zona.

En cuanto a la clase 6, el cultivo del maiz responde muy bien a las prácticas conservacionistas que se están introduciendo en la zona (siembra en contorno, acequias de infiltracion y barrera de piña); mientras que en el tabaco la siembra en contorno es una práctica generalizada, pero dada la pendiente del terreno (de hasta 35%), es insuficiente, por lo que deberia acompañarse de alguna otra práctica biológica complementaria.

La clase 2, caña de azucar, contribuye en buena medida a la erosión, ya que es un cultivo que, aunque brinda buena cobertura al suelo, porque es denso y con bastante follaje, es renovado con cierta frecuencia (5 ó 6 años) con prácticas intensas que dañan el suelo, por lo cual tambien seria bueno introducir un sistema de bordas, que proteja mejor el suelo (ODA, 1980).

Se observan entonces, tres comportamientos potenciales erosivos, con base en el uso de la tierra: el área urbana y cauce de rio, donde es de esperarse tasas criticas de erosión debido al alto escurrimiento e inestabilidad de los taludes; seguido, el área correspondiente a cultivos anuales con tasas promedio de erosión, y por último, las áreas con cobertura vegetal permanente (café-frutales, pastos y forestales) donde la erosión es minima. salvo aquellas áreas con grandes limitaciones de pendiente, donde no se debe disturbar el

cultivo, para evitar asi el inicio de cualquier proceso erosivo intenso.

Debe aclararse que la erosión ligada al cauce de rio no se refiere a la erosión estrictamente del flujo del rio sino que a la erosión laminar en las terrazas aluviales bajas, próximas al cauce.

5.2 Estimación de la erosión total en la cuenca del rio Las Cañas aplicando la USLE

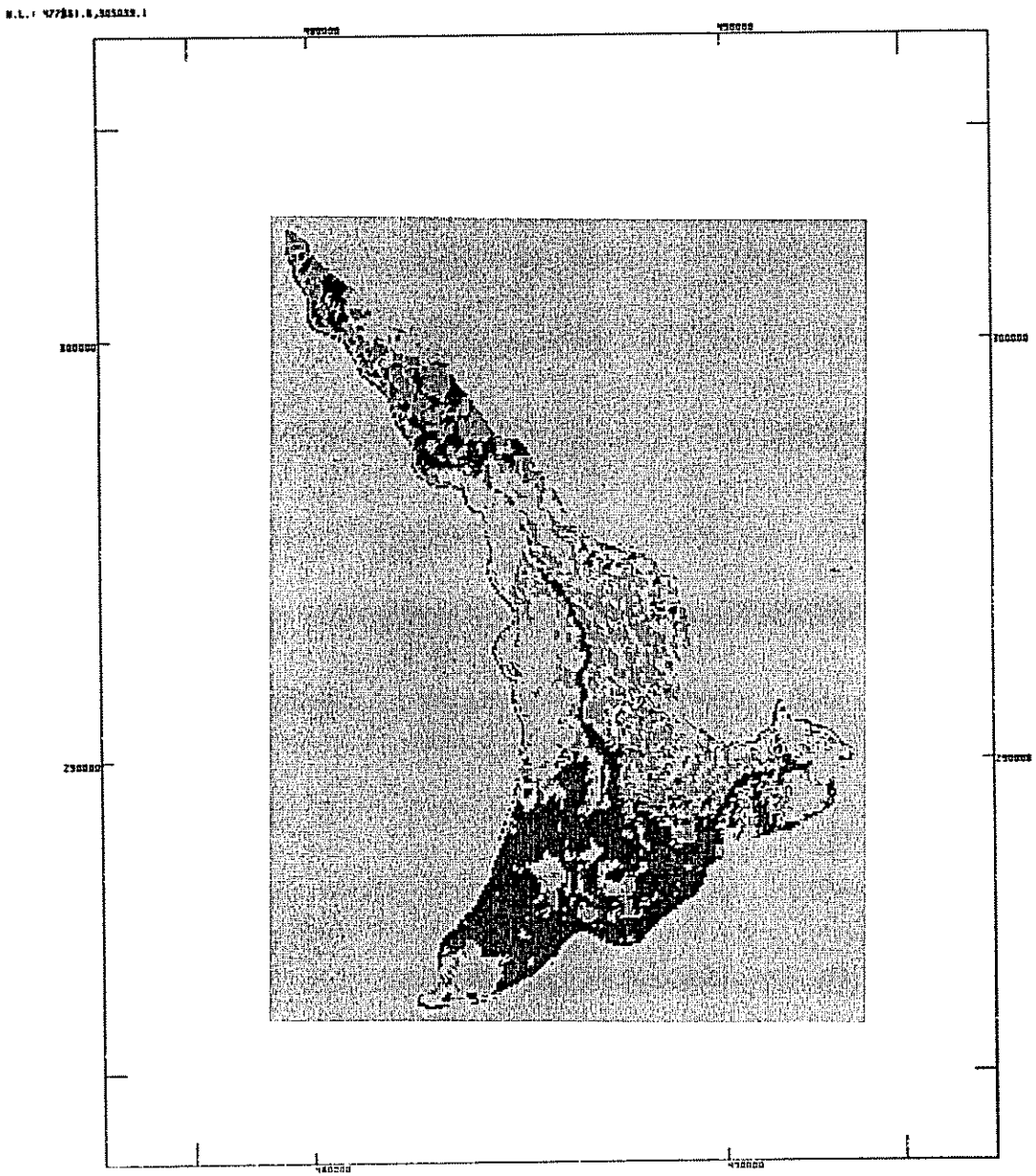
En cuanto a la erosión total del suelo estimada por el estudio, el siguiente cuadro muestra la distribucion porcentual dentro de la cuenca y el mapa ó su distribución espacial.

Cuadro 6. Distribucion porcentual de la erosión (estimada con la USLE y la utilización de un SIG), expresada en Ton/ha/año. Cuenca rio Las Cañas, El Salvador.

Clase	Rango (T/ha/a)	Area (%)
1	1-100	37.69
2	100-200	21.96
3	200-300	4.30
4	300-400	15.92
5	400-500	18.05
6	500-600	0.10
7	600-700	1.61
8	700-800	0.32
9	800-900	0.05

Se puede ver que la mitad del área total se encuentra en la clase 1, que produce menos de 200 T/ha/a, lo cual se

Fig. 6. Mapa final de clases de erosión (T/ha/año) en la cuenca del río Las Cañas.



Clases de erosión (T/ha/año)

- 0-100
- 100-200
- 200-300
- 300-400
- 400-500
- 500-600
- 600-700
- 700-800
- 800-900

Esc. 1:174

considera tolerable, en virtud del tipo de suelo en la zona, suelos de origen volcánico y profundos.

Las clases 4 y 5 que producen entre 300 y 500 T/ha/a se consideran criticas porque la cantidad de sedimentos que producen va más alla de los limites tolerables por el suelo, mientras que las clases que producen más de 500 toneladas, son áreas casi puntuales, que no influyen directamente en el aporte total de la cuenca.

Segun el mapa final de clases de erosión (Mapa 6) se observa que espacialmente dichas áreas corresponden, a la clase 8, a lo largo del cauce del rio, en la parte baja de la cuenca, donde existe un depósito de extraccion de arena, y además donde finaliza la parte urbana.

La parte urbana contribuye con mayor cantidad de sedimentos, ya que casi la totalidad del área se encuentra entre las clases 4 y 5, mientras que la parte forestal, pastos y café-frutales, tienen tasa menor de 100 T/ha/a.

El cauce del rio es talvez el área más problemática, que reporta los mayores valores observados.

Las clases 1 y 2, correspondientes a cultivos anuales y cana de azucar, aportan un promedio entre 100 y 200 T/ha/a, lo cual era de esperarse, ya que en un estudio realizado por Sheng (1975), se encontró que el maiz sembrado en forma tradicional presentaba una perdida de hasta 127 Ton/ha/a, asimismo se reportó que al establecer prácticas de conservación de suelos, estos valores pueden disminuir hasta 13 y 15 T/ha/a (Sheng, 1975), por lo que cabe esperar que al

implementar prácticas conservacionistas con el Proyecto de Rehabilitación, los valores de erosión de estos cultivos, disminuyan considerablemente.

5.3 Análisis del comportamiento de la erosión en la cuenca, estimado con un SIG y la USLE

Se observa que una buena forma de integrar información de factores climáticos, biofisicos y de actitud humana para estimar erosión, calculando las variables a nivel de cuenca, en forma eficiente y analitica es, por medio de análisis espacial con un sistema de información geográfica.

Los umbrales de erosión hidrica encontrados en la cuenca, expresados en T/ha/a son: un minimo de 3 Ton/ha/a y un máximo de 395; la distribución espacial se muestra en el Mapa Final de erosión (Mapa 7), que es el resultado de la sobreposición de los mapas ya descritos, para calcular la lámina A.

Los valores estimados se observan en el cuadro 9, asi como el área correspondiente a cada tasa de erosión y su frecuencia acumulada.

Cuadro 9. Distribución de frecuencias acumuladas de los valores calculados de erosión real (en T/ha/a) en la cuenca del rio Las Cañas.

Clase	Frecuencia	Area (%)	FAc(%)
1	1-15	7.1	17.1
2	1-25	17.2	17.2
3	25-50	6.6	23.8
4	50-75	12.1	35.9
5	75-100	2.5	38.4
6	100-125	0.3	42.7
7	125-150	6.9	49.6
8	150-175	6.9	56.5
9	175-200	3.1	59.6
10	200-300	3.7	63.3
11	300-400	25.4	88.7
12	400-500	8.4	97.1
13	500-600	0.9	98.0
14	600-700	1.6	99.6
15	700-800	0.3	99.9
16	800-900	0.1	100.0

Se puede observar que un 17.1% del área (1308.1 Ha) tienen tasa de erosión menor que 15 T/ha/a. lo cual es una erosión permisible (Smith y Stanney; 1965, citado por ENEE, 1988) equivalente a una pérdida de suelo entre 0.5 - 1.5 mm, con lo cual 20 cms de suelo se pueden llegar a perder en un periodo entre 133-400 años. Esta tasa de erosión es la que se presenta en las áreas correspondientes al uso forestal mayormente.

De igual manera, un 23.8% presenta tasa de erosión menor que 50 T/ha/a, la cual, dada la profundidad de los suelos puede considerarse también dentro del rango permisible. En general, éstas áreas son las que espacialmente corresponden al cultivo del café con sombra, forestales y pastos con poca pendiente y buena cobertura, por lo que se deduce que el

factor de cobertura juega un papel importante en la erosión total.

De igual manera las áreas con tasa menor que 100 T/ha/a, corresponden a los mismos tipos de cultivo (café, forestal y pastos) pero acá entran en juego los factores de la pendiente del terreno y la erodibilidad de los suelos, en una zona correspondiente a 38.4% (2920.5 Ha).

En cuanto a la clase con tasa entre 100-200 T/ha/a, según Sheng (1975) acá se localizan las áreas de producción de granos básicos, tabaco y caña de azucar, con un 20.6% del área. Debe notarse que de manera general, no deben coincidir las áreas reportadas por la clasificación, con las áreas con determinada tasa de erosión, ya que aquí también pueden existir pequenas subáreas en las cuales, las pérdidas sean menores y estén más influenciadas por la pendiente menos pronunciada, suelos más estables o menor energía de la lluvia, que por la cobertura vegetal o la falta de prácticas de conservación. También debe mencionarse el efecto de los caminos de acceso a las fincas aisladas dentro de los campos de cultivo más grandes, sobre todo en las zonas donde de pequeñas fincas (<0.5 Ha).

Para la tasa de pérdida entre 200-300 T/ha/a, que corresponde a sólo 3.7% del área, puede decirse que talvez el origen sea en parte por zonas de cultivos altamente erosivos en mucha pendiente (tabaco sembrado en pendiente de hasta

40%), o igualmente puede corresponder a áreas urbanas con intercalado de cultivos.

Las zonas con tasa entre 300-500 T/ha/a con un 33.8% (2570.6 Ha) corresponden espacialmente al área urbana, aunque aquí debe diferenciarse que existen dos fases distintas, el área ya establecida que práacticamente no aporta sedimentos (Sanabria, 1978) y las zonas de transición a urbano, donde, como se mencionó, existe manejo de grandes volúmenes de tierra. Dado el posicionamiento de manera intercalada de estas 2 fases y la dificultad de ser clasificado exactamente con el numero de bandas disponibles fgen la imagen, se establece el área total con esta tasa. Acá, prácticamente el total de erosión se puede asignar a la falta de cobertura del suelo, la remoción de partículas por motivo de manejo, con lo que se disminuye la estabilidad y lo hace susceptible a la energía de la lluvia; ya que en esta zona la pendiente predominante es menor o igual al 10%.

El resto del área, un 2.9% (220.6 Ha) con erosión mayor que 500 T/ha/a, corresponde a áreas en las cuales además de falta de cobertura vegetal, existen condiciones de pendiente fuerte, cohesión débil de los taludes y, áreas en las cuales la energía de la lluvia no tiene obstáculos (parte baja de la cuenca), las cuales favorecen totalmente la erosión.

Espacialmente estas áreas corresponden al lecho del rio en su mayor parte, donde el cauce presenta suelo desnudo y arrastre de partículas por acción del agua, lo cual vuelve completamente inestable al suelo. Estas zonas son mayormente

puntuales y corresponden en buena medida a sitios donde actualmente se extrae arena sin ninguna limitación más que la seguridad fisica de los trabajadores, ya que se cortan taludes completos para aumentar el volumen de extracción (confluencia Las Cañas y quebrada El Sauce). En este y algunos sitios cercanos se estimó en 1980 (ODA), una tasa diaria de extracción de arena de hasta 750 m3.

El resultado total muestra que el factor con mayor peso relativo en el proceso de erosión a nivel de cuenca, corresponde a la protección ejercida por el desarrollo de los cultivos, representada por el factor de cultivo (C) representado por el uso de la tierra, el cual presenta valores extremos, desde erosión critica a nivel del cauce y lecho del rio, algunos términos intermedios como el cultivo de tabaco, caña de azucar y maiz, hasta una forma de explotación sostenible, las zonas con cultivo de café-frutales, pastos y forestal. Por lo que se puede afirmar que el factor de cultivo es determinante de la erosión, ya que la falta de cobertura vegetal permite que la energia de la lluvia arrastre las particulas de suelo, lo cual se traduce en inestabilidad y posterior arrastre.

Se ha reportado que las prácticas de conservación de suelos pueden causar reducciones drásticas en las tasas de erosión que se observan en los cultivos. Por esto, se considera que existen alternativas viables para reducir la erosión en todas aquellas áreas de cultivo en que existan

limitaciones naturales de pendiente, suelos altamente disturbados o alta energia erosiva de las lluvias.

Al considerar cómo influye la longitud y pendiente del terreno en la erosión de suelos en la zona, se puede decir que sólo es determinante en las áreas sembradas con tabaco en pendientes mayores del 20%, ya que las otras áreas con pendiente fuerte (parte alta y media) presentan cultivos que protegen al suelo (café-frutales y forestal) igualmente el área urbana establecida (pendiente < 10%).

La erosividad de la lluvia, afecta el comportamiento de la erosión en la cuenca de manera más pronunciada en la parte baja, dada la falta de barreras naturales y la pendiente moderada del terreno lo que causa salpicadura en particulas de suelo más gruesas, livianas, las cuales son fácilmente transportadas por la escorrentia. Esto contribuye mucho a la erosión, solamente cuando no existe alguna cobertura vegetal que amortigue el potencial erosivo de la lluvia, por lo que, igualmente que con los suelos, en la medida que se mantenga la cobertura vegetal, no es un factor que sea causa grave de erosión.

Por ultimo, puede decirse que los suelos de la cuenca, en condiciones de equilibrio natural; en la parte alta son menos erodables, ya que poseen buen contenido de materia orgánica y cohesión entre las particulas; mientras que en la parte baja son deficientes en nutrientes, con poca cohesión y mayor tamaño de particula, lo cual los vuelve más vulnerables a la erosión. Por esto, en la medida en que se mantenga presente

una cobertura vegetal y se implementen prácticas agrícolas adecuadas, los suelos son el factor que talvez presenta menos posibilidades de causar erosión.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

-Las tasas mayores de erosión en la cuenca (800 T/ha/a o más), espacialmente, corresponden a las zonas bajas a lo largo del cauce del rio (terrazas aluviales bajas), con un 7.03% del área; lo que implica que el aporte total de sedimentos de esta área es alto o no existen mecanismos de retención de sedimentos, desde las partes altas.

-Existen dos niveles predominantes de comportamiento erosivo asociados con los cultivos anuales y el área urbana, mayor de 200 T/ha/a y > 500 T/ha/a respectivamente, lo que sugiere dos posibles alternativas, para controlar la erosión; en la parte agricola pueden implementarse prácticas biológicas de conservación de suelos, dada la escasez de madera y piedras; mientras que en la parte urbana pueden construirse estructuras mecánicas de control de sedimentos, y drenajes.

-Dado que los resultados mostraron que el área que origina mayor cantidad de sedimentos es, la parte correspondiente al lecho y riberas del rio, se debe profundizar en las tasas de transporte y deposición que se presentan.

-Dada la intensidad de la erosión en la parte baja del cauce del rio (> 800 T/ha/a), es de esperarse un mayor azolvamiento en la represa producto de la erosión de suelos en la cuenca;

porque prácticamente los sedimentos se producen cerca a la desembocadura del rio, donde sólo deben ser transportados hasta el embalse.

-Habiéndose determinado que el uso de la tierra incide directamente en la erosión del suelo, se recomienda continuar con el Programa de Rehabilitacion de la Subcuenca del rio Las Cañas, que actualmente desarrolla la CEL, con el objetivo de organizar el uso del suelo en la zona y detener el proceso erosivo y asi lograr la sostenibilidad del recurso a largo plazo.

-Se recomienda la utilización del modelo SIG y sensores remotos por parte de la CEL para evaluar la erosión en otras áreas de interés para la producción hidroeléctrica (bajo Lempa) y en áreas con peligro de inundaciones (rio Grande de San Miguel).

-Se recomienda simular en el presente modelo, cambios en el régimen de lluvias, en los contenidos de materia orgánica de los suelos (o el factor K en general), en los patrones de cultivo y, en las prácticas de conservación de suelos, para evaluar cómo inciden en la erosión total en un área determinada. Asimismo deben evaluarse diferentes tasas promedio de sedimentación y su efecto total en la deposición de sedimentos en las represas.

7 BIBLIOGRAFIA

ANYS, H.; BONN, F.; MERZOUK, A. 1991. Remote Sensing and GIS based mapping and modeling of water erosion and sediment yield in a semi-arid watershed of Morocco. Université de Sherbrooke. Quebec, Canada. 14 pp.

BENSON, P. 1990. New center aimed at regional decision-makers. In GIS World. Fort Collins, Colorado. 3(1): 49-51 p.

BUENO, J.; HERNANDEZ, J.; LAZO, R.; 1990. Análisis económico de los proyectos de conservación de suelos y del distrito forestal de Metapán, Conservación y aprovechamiento integral de los recursos naturales en la cuenca norte del embalse del Cerrón Grande y apoyo agroforestal a comunidades rurales de escasos recursos. Documento preliminar presentado al Banco Mundial. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Soyapango. El Salvador. s.p.

COLLINET, J. 1992. Comunicaciones personales. CATIE. Turrialba, C. R. Enero-julio/92.

COLLINET, J.; MEDRANO, R. 1991. Diagnósticos, potencialidades y factores limitantes de algunos de los sistemas de suelos representativos de una subcuenca del río "Las Cañas" (El Salvador). Turrialba, C. R., CATIE. 43 p.

CONVENIO CEL/MAG/CATIE. 1991. Plan de Acción: Proyecto "Rehabilitación de la Subcuenca del río Las Cañas". San Salvador, El Salvador. 18 p.

DAUGHERTY, H. 1973. Conservación Ambiental en El Salvador con un plan maestro para parques nacionales y reservas equivalentes. Desarrollo Forestal y Ordenación de cuencas

hidrográficas. Informe Técnico PNUD-FAO. El Salvador. 107 p.

EMTECSA DE CV. 1985. El Salvador. Perfil Ambiental. Estudio de campo. Ed. por H. Juárez y R. Orellana. Contrato USAID. San Salvador. El Salvador. 266p.

FAUSTINO, J. 1984. Metodología para priorización de subcuencas y zonas de tratamientos con fines de conservación de suelos y aguas. Turrialba, C. R., CATIE. 24 p.

_____, 1991. Comunicaciones personales. CATIE. Turrialba Costa Rica. Jun-Oct/91.

FOSTER, G. 1991. Advances in wind and water prediction. In Journal of Soil & Water Conservation. Ankeny, Iowa. 46(1): 27-29 p.

FOUNDATION FOR INTERNATIONAL TRAINING; OPEN LEARNING AGENCY. Decision making & the environment. Ontario, Canada. 26 p.

GONZALEZ, A. 1986. Identificación de áreas criticas y formulación de directrices generales para un desarrollo sostenido, en la cuenca del rio Grande de Térraba, Costa Rica. Tesis M. Sc. Turrialba, C R, CATIE. 210 p.

GOUJON, P. 1968. Conservación de los suelos en Africa y en Madagascar. 1a Parte: Los factores de la erosión y la Ecuación Universal de Wischmeier. In "Bois et Forets des Tropiques". Centro Técnico Forestal Tropical de Francia. Francia. 118, 119, 120, 121 (marzo-octubre). 37 p.

HELMS, J. 1988. A Centennial profile: Walter Clay Lowdermilk. In Journal of Soil & Water Conservation. Ankeny, Iowa. 43(4): 296 p.

HUDSON, N. 1982. Conservación del suelo. Editorial Reverté. Madrid, España. 335 p.

KIRKBY, M; MORGAN, R. 1984. Erosión de Suelos. Comp. por Kirkby y Morgan. 1a. Ed. México, D. F. LIMUSA. 375 p.

LAND RESOURCES CENTRE. 1981. A management plan for the Acelhuate river catchment. Land Resources Study No.30. Ed. J.Wall. Overseas Development Agency, Gran Bretaña. 284 p.

LUDEKE, K.; MAGGIO, R.; REID, L. 1990. An analysis of anthropogenic deforestation using logistic regression and GIS. In Journal of Environmental Management. 31: 247-259 p.

MORA, I. 1987. Evaluación de la pérdida de suelo mediante la Ecuación Universal (EUPS): Aplicación para definir acciones de manejo en la cuenca del rio Pejibaye, vertiente atlántica, Costa Rica. Tesis M. Sc. Turrialba, C. R., CATIE. 104 p.

OREAMUNO, R.; SABORIO, J. 1990. Elaboración automatizada del mapa de erosión de la cuenca alta del rio Virilla. s.n.t.

RENARD, K.; FOSTER. G.; WEESIES, G., 1991. RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation. In Journal of Soil and Water Conservation. Ankeny, Iowa. 46(1): 30-33 p.

SAND, D. 1988. Viewpoint: Where are the conservacionists? In Journal of Soil & Water Conservation. Ankeny, Iowa. 43(4): 278 p.

SHENG, T. 1990. Desarrollo de Recursos, Fomento y Conservación de suelos. Conservación de suelos para los pequeños agricultores en las zonas tropicales húmedas. Dirección

de Fomento de Tierras y Agua. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura. Boletin No. 60. 5-12 pp.

SIBILIA, T. 1968. Análisis de la dinámica del uso de la tierra en las áreas marginales de la cuenca alta del rio Nizao de la Republica Dominicana para definir acciones de manejo apropiado de sus recursos naturales. Tesis M. Sc. CATIE, Turrialba. C. R. 240 p.

SIMANTON, J. 1987. Soil Loss estimates using the Universal Soil Loss Equation: "Revisled USLE for rangeland". Versión 3.16. USDA-ARS. Tucson, Arizona, USA.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Our Planet, The United Nations Environment Programme Magazine. Kent, U. K. 4:(2). 19 pp.

WERTZ, W. 1992 Dynamic fire simulations for training and prediction. In GIS World. Fort Cción física de los suelos en la cuenca alta del rio Chiriqui Viejo con fines de conservación. Chiriqui, Panamá. Tesis M. Sc. CATIE, Turrialba. C. R. 198 p.

WISCHMEIER, W.; SMITH, D. 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. Trans. Am. Geophy. Union 39. 285-291 pp.

_____. 1978. Predicting rainfall losses, a guide to conservation planning. Agr. Handbook No. 537. USDA. Washington D. C. EE. UU. 58 p.

ANEXOS

nexo 1. Energía Cinética de la Lluvia Natural (kg-m/m2-mm) en función de la intensidad (en mm/h).

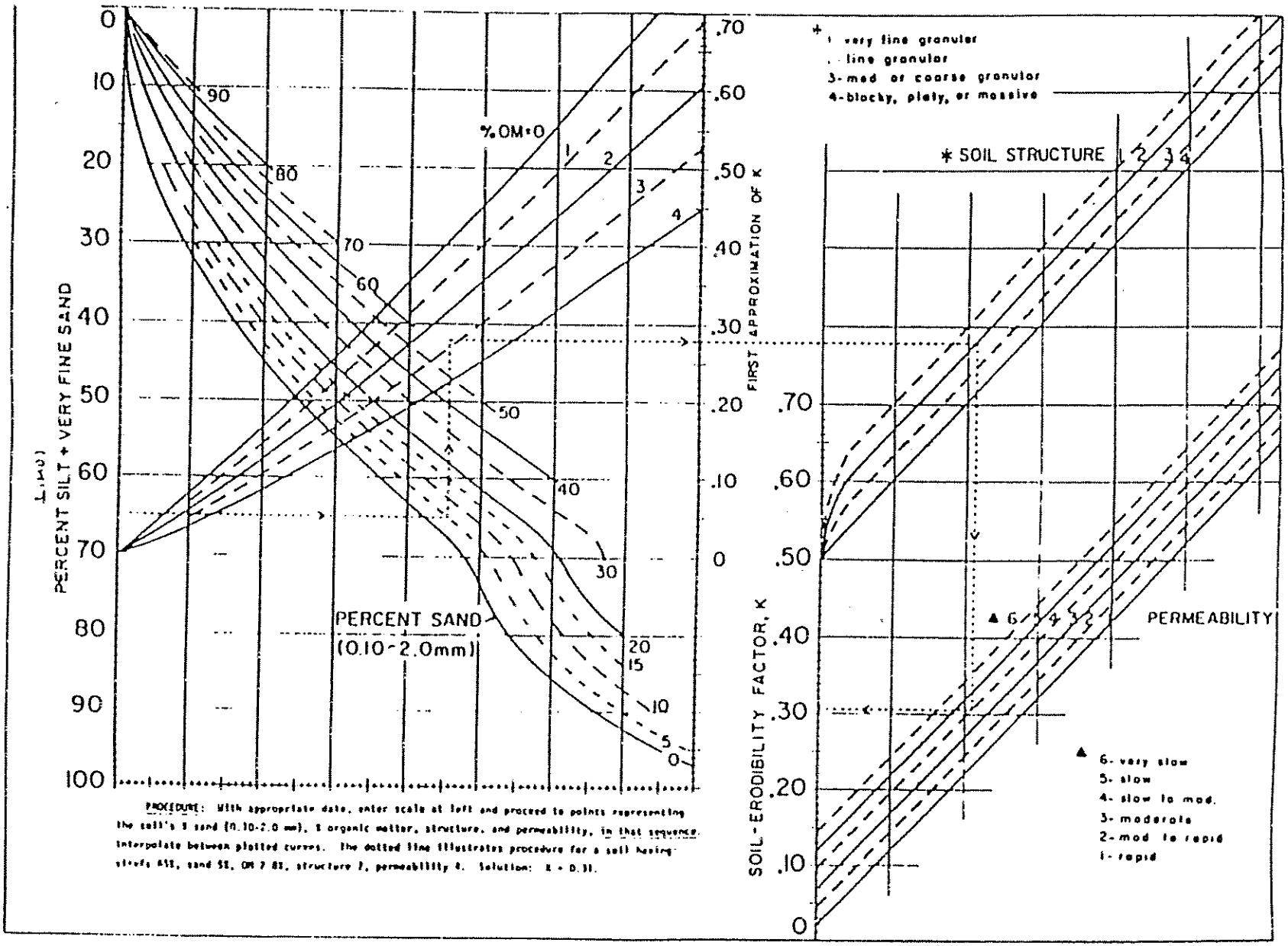
MM	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	MM
0		0.326	0.593	0.74	0.86	0.95	1.02	1.08	1.13	1.17	0
1	1.21	1.25	1.28	1.31	1.34	1.37	1.39	1.42	1.44	1.46	1
2	1.48	1.50	1.52	1.53	1.55	1.57	1.58	1.60	1.61	1.62	2
3	1.64	1.65	1.66	1.67	1.68	1.70	1.71	1.72	1.73	1.74	3
4	1.75	1.76	1.77	1.77	1.78	1.79	1.80	1.81	1.82	1.82	4
5	1.83	1.84	1.85	1.86	1.86	1.87	1.88	1.88	1.89	1.90	5
6	1.90	1.91	1.92	1.92	1.93	1.93	1.94	1.95	1.95	1.96	6
7	1.96	1.97	1.97	1.98	1.98	1.99	1.99	2.00	2.00	2.01	7
8	2.01	2.02	2.02	2.03	2.03	2.04	2.04	2.05	2.05	2.06	8
9	2.06	2.06	2.07	2.07	2.08	2.08	2.08	2.09	2.09	2.10	9

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	MM
10	2.10	2.13	2.17	2.20	2.23	2.26	2.28	2.30	2.33	2.35	10
20	2.37	2.39	2.40	2.42	2.44	2.45	2.47	2.48	2.50	2.51	20
30	2.52	2.54	2.55	2.56	2.57	2.58	2.59	2.60	2.61	2.62	30
40	2.63	2.64	2.65	2.66	2.67	2.68	2.69	2.70	2.71	2.71	40
50	2.72	2.73	2.74	2.74	2.75	2.76	2.76	2.77	2.77	2.78	50
60	2.79	2.80	2.80	2.81	2.82	2.82	2.83	2.83	2.84	2.84	60
70	2.85	2.86	2.86	2.87	2.87	2.88	2.88	2.89	2.89	2.90	70
80	2.90	2.91	2.91	2.92	2.92	2.93	2.93	2.93	2.94	2.94	80
90	2.95	2.95	2.95	2.96	2.96	2.97	2.97	2.98	2.98	2.98	90

	00	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
00	2.99	3.02	3.06	3.09	3.12	3.14	3.17	3.19	3.21	3.23	100

Fuente: Dissmeyer y Foster, 1984.

Anexo 2. Nomograma para calcular la erodibilidad del suelo.



Fuente: Wischmeier y Smith, 1978.