

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**COMPARACIÓN DE MÉTODOS EN LA ESTIMACIÓN
DE EROSIÓN HÍDRICA**

TESIS DE LICENCIATURA

Que como requisito parcial para optar al título de
INGENIERO FORESTAL

Presenta

MARITZA GUTIÉRREZ GUTIÉRREZ

Linares, N. L., México,

Mayo de 2002



TL
QE581
.G8
2002
c.1



1080124507

TL
QE581
.G8
2002



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**COMPARACIÓN DE MÉTODOS EN LA ESTIMACIÓN
DE EROSIÓN HÍDRICA**

TESIS DE LICENCIATURA

Que como requisito parcial para optar al título de
INGENIERO FORESTAL

Presenta

MARITZA GUTIÉRREZ GUTIÉRREZ

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

**COMPARACIÓN DE MÉTODOS EN LA ESTIMACIÓN
DE EROSIÓN HÍDRICA**

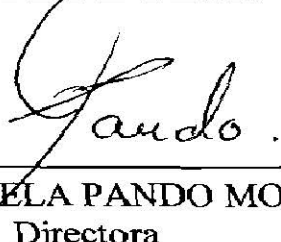
TESIS DE LICENCIATURA

Que como requisito parcial para optar al título de
INGENIERO FORESTAL

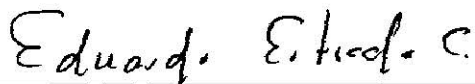
Presenta

MARITZA GUTIÉRREZ GUTIÉRREZ

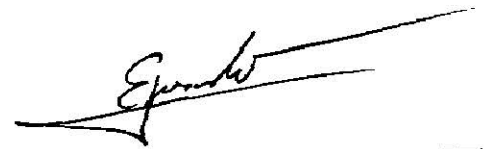
COMITÉ DE TESIS



DRA. MARISELA PANDO MORENO
Directora



DR. A. EDUARDO ESTRADA CASTILLÓN
Asesor



DR. ENRIQUE JURADO YBARRA
Asesor

DEDICATORIA

A Dios por darme la vida y ayudarme a lograr cuanto me he propuesto.

A mis padres:

Rosa Obdulia Gutiérrez Arellano y Pedro Gutiérrez Flores

Por educarme, guiarme y apoyarme en todas las etapas de mi vida, los AMO.

¡Este logro es de ustedes!

A mi hermana Iris y a Edgar por formar parte de mi vida y por el gran regalo que me han brindado al tener a mis hermosas sobrinas Iris Jared y Karla Rossana quienes con su cariño han llenado de alegría mi existencia.

A ti Víctor por apoyarme en todo momento, por tu excepcional cariño, por comprenderme siempre y por quererme tanto, gracias chaparro, te quiero mucho.

A ustedes les dedico mi trabajo de todo corazón.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a mi amiga la Dra. Marisela Pando Moreno por la perfecta asesoría brindada y por los excelentes comentarios y sugerencias durante el tiempo de realización de la tesis.

Al Dr. A. Eduardo Estrada Castellón y al Dr. Enrique Jurado Ybarra, por el tiempo dedicado a la revisión del anteproyecto de tesis y al escrito final, así como por hacer las observaciones correspondientes a cada uno de éstos.

A Manuel Soto Ramos, Juan A. López Carmona, Alfredo Ortega Guerra y Joel Bravo Garza, por acompañarme en las salidas a campo y por trabajar con tanto empeño, ¡¡¡Gracias Chicos!!!.

Al Dr. Israel Cantú Silva encargado del laboratorio de suelos y a los técnicos Inés Yáñez Díaz y Manuel Durán Olvera por las facilidades otorgadas para la realización de los análisis necesarios en esta investigación.

Al Ing. Víctor M. Molina Guerra por su comprensión y apoyo incondicional en todo momento, así como por su colaboración durante el trabajo de campo y de laboratorio.

A Miguel Ángel González Botello por su amistad y por el apoyo en la elaboración y edición del mapa de ubicación del área.

A mis amigos y compañeros: Erika, Miguel, Rolando, Hugo, Federico y Francisco, por todos los agradables momentos que hemos pasado juntos, gracias por su apoyo y por su amistad.

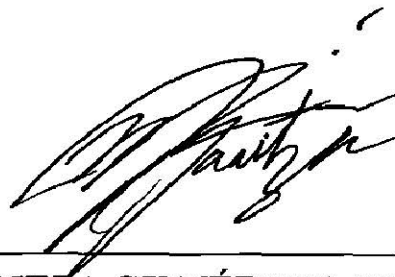
A todos los profesores de la Facultad de Ciencias Forestales por impartirme sus conocimientos y por ser parte de mi formación académica.

Al personal de la Facultad de Ciencias Forestales por las atenciones brindadas.

Quiero agradecer de manera especial al Programa de Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica (PAICYT) de la Universidad Autónoma de Nuevo León por el financiamiento de esta investigación dentro del proyecto registrado bajo la clave CT631-01.

A todos ustedes... ¡Muchas Gracias!

Declaro que la presente investigación es original, y se desarrolló para obtener el título de *Ingeniero en Ciencias Forestales*; donde se utiliza información de otros autores, se otorgan los créditos correspondientes.



MARITZA GUTIÉRREZ GUTIÉRREZ

Mayo de 2002

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
HIPÓTESIS	2
OBJETIVOS GENERALES	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
CAPÍTULO I. EROSIÓN HÍDRICA.....	4
1.1 GENERALIDADES.....	4
1.2 ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO	6
1.2.1 Métodos directos	6
1.2.2 Métodos indirectos	8
CAPÍTULO II. ÁREA DE ESTUDIO	14
2.1 UBICACIÓN.....	14
2.2 CLIMA.....	17
2.3 FISIOGRAFÍA	17
2.4 GEOLOGÍA.....	18
2.5 GEOMORFOLOGÍA	18
2.6 SUELO.....	19
2.7 USO DE SUELO Y VEGETACIÓN	21
2.8 FAUNA.....	23
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....	24
3.1 DELIMITACIÓN DE UNIDADES AMBIENTALES	24
3.2 ESTIMACIÓN DE EROSIÓN HÍDRICA POR EL MÉTODO INDIRECTO	24
3.2.1 Factor de erosividad de la precipitación “R”	25
3.2.2 Factor de erodabilidad del suelo “K”.....	26
3.2.3 Factor de longitud de pendiente “L” y factor de gradiente de pendiente “S”	28
3.2.4 Factor de cultivo y manejo ó factor de cobertura y manejo “C”	29
3.2.5 Factor de prácticas de control “P”	30
3.3 ESTIMACIÓN DE EROSIÓN HÍDRICA POR EL MÉTODO DIRECTO.....	30
3.4 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DIRECTO E INDIRECTO	31
CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33

4.1 DELIMITACIÓN DE LA MICROCUENCA EN UNIDADES AMBIENTALES	33
4.2 ESTIMACIÓN DE EROSIÓN HÍDRICA MEDIANTE EL MÉTODO INDIRECTO	41
4.3 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DIRECTO E INDIRECTO	44
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	50
LITERATURA CITADA	52
ANEXOS	59

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1.- Tipos de suelo encontrados en la microcuenca, superficie y porcentajes ocupada por ellos, con respecto al total de la microcuenca	19
Cuadro 3.1.- Unidades geomorfológicas y superficie de cada una reportadas por Maldonado (2001), para el área de estudio	31
Cuadro 4.1.- Clasificación de pendientes en la microcuenca, superficie ocupada y porcentaje con respecto al total del área	33
Cuadro 4.2.- Uso de suelo y vegetación encontrada en la microcuenca, superficie ocupada y porcentajes con respecto a la superficie total	34
Cuadro 4.3.- Superficie ocupada por cada una de las Unidades Ambientales en la microcuenca	40
Cuadro 4.4.- Valores de los factores utilizados para calcular erosión en cada Unidad Ambiental	42
Cuadro 4.5.- Pérdida de suelo estimada para cada Unidad Ambiental, utilizando las dos variantes del método indirecto	43
Cuadro 4.6.- Toneladas de suelo perdidas (totales y por hectárea) para cada Unidad Geomorfológica de la microcuenca, estimadas por los diferentes métodos	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.- Ubicación del área de estudio	16
Figura 3.1.- Mapa de las Unidades Geomorfológicas de la microcuenca	32
Figura 4.1.- Mapa de los tipos de suelo presentes en el área de estudio	35
Figura 4.2.- Delimitación de pendientes en la microcuenca	36
Figura 4.3.- Estratificación de la microcuenca de acuerdo al uso de suelo y vegetación	37
Figura 4.4.- Delimitación de la microcuenca por Unidades Ambientales	39
Figura 4.5.- Tasas de erosión de suelo estimadas para cada Unidad Geomorfológica, en comparación con las tasas reales de erosión para el año de 1999	45
Figura 4.6.- Comparación de tasas de erosión reportadas por el método directo y estimadas por el método indirecto, variante índice de Fournier	46
Figura 4.7.- Tasas totales de erosión, reales y estimadas, para la microcuenca de la presa “La Estrella”	48

RESUMEN

Se estimó la erosión hídrica mediante la Ecuación Universal Revisada para la Estimación de la Pérdida de Suelo (RUSLE), con dos variantes (FAO e índice P/2), en una microcuenca ubicada en el Noreste de México. La microcuenca se estratificó en unidades ambientales para aplicar la ecuación. Los resultados de las variantes se compararon entre sí y contra los datos de erosión real para esta área. Las dos variantes utilizadas del método indirecto coinciden al señalar las mismas unidades de mayor tasa de erosión; sin embargo, los valores estimados con el índice P/2 son cuatro veces el valor estimado por la variante FAO. Para comparar las variantes del método indirecto contra los valores reales de erosión, se reagruparon las UA en unidades geomorfológicas. La variante índice P/2, sobrestimó los valores reales de erosión para todas las unidades de la microcuenca, mientras que la variante FAO sobrestimó los valores reales en pendientes altas y los subestimó en pendientes bajas. Aún y cuando la variante FAO arrojó valores cercanos a los obtenidos por el método directo en la mayoría de las unidades, al comparar la tasa de erosión total para la microcuenca mediante este método y el método directo, se observa una subestimación de los valores reales. Las diferencias más notorias entre las tasas de erosión subestimadas por el método de FAO y las obtenidas por el método directo se dan en las unidades donde se presentan cárcavas, las cuales no son consideradas en el método indirecto utilizado. Por tanto se sugiere incorporar a la ecuación un factor de ponderación para áreas con cárcavas.

ABSTRACT

Two variants of the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) were used to predict fluvial erosion in a small semiarid basin (22.32 km²) in Northeastern Mexico. Results were compared between variants and to erosion rates from field-collected data. Homogeneous environmental units (EU) were defined within the basin in order to apply the equation. Both variants from the RUSLE methods revealed the same EU as having the highest erosion rate; however, values from the R/2 (annual rainfall divided by 2) index were four times higher than those from the FAO variant. The R/2 index overestimated erosion rates obtained on the field for all the units; while FAO's index overestimated erosion in steep units and underestimated it in more flat areas. Although FAO index showed erosion rates somehow similar to those measured on the field for most of the units, it underestimated the total erosion rate for the basin as a whole. The most remarkable differences on erosion rates, between the direct and FAO methods, were for those units where gullies have developed. In these cases, erosion was underestimated by FAO's index. Hence, it is suggested that a weighted factor for presence of gullies should be developed and included in this equation.

INTRODUCCIÓN

A medida que la población humana aumenta, las necesidades de ésta se incrementan considerablemente ejerciendo una presión cada vez mayor sobre los recursos naturales. La mayoría de las veces, esta presión se da de manera desordenada, afectando los procesos naturales y provocando la degradación del medio.

El suelo es uno de los componentes del medio que se ve fuertemente afectado cuando no se practica un manejo adecuado de los recursos naturales. Son muchas las consecuencias de un mal manejo que repercuten directamente en el suelo; entre éstas destacan la erosión, compactación, salinidad, encostramiento, disminución de fertilidad, etc., todas éstas pueden ser englobadas en una sola: la degradación del suelo.

En México, la erosión hídrica es la que más agobia a las tierras, debido a que el 65% del territorio nacional tiene pendientes mayores a 10%. Esta situación, aunada a una escasa cobertura vegetal al inicio de las lluvias, incrementa el riesgo de erosión hídrica en más del 70% del territorio, llegando a ser extrema en un 9% del país (CONAZA, 1994).

Una cobertura vegetal pobre expone al suelo al golpeteo directo de las gotas de lluvia haciéndolo más susceptible a la erosión. Cuando un suelo es alterado, se afecta su capacidad de infiltración, de modo que aumentan los escurrimientos superficiales, que arrastran consigo partículas de suelo que salen del sistema, empobreciéndolo.

El conocimiento de la tasa de erosión en un sitio es fundamental para decidir el manejo y las medidas de conservación de suelo más adecuados; por ello, es importante

obtener datos confiables acerca de los procesos y la velocidad a la que se está perdiendo el suelo.

Los métodos directos para la evaluación de la erosión hídrica suelen proporcionar datos precisos pero son laboriosos, requieren mucho tiempo y son costosos. Los métodos indirectos para evaluar la tasa de erosión son relativamente fáciles de aplicar pero su precisión no ha sido ampliamente probada para los diferentes usos de suelo. El presente trabajo compara los resultados obtenidos por ambos métodos: directos e indirectos, para un área específica y evalúa la precisión de estos últimos.

HIPÓTESIS

Ha: El método indirecto más ampliamente utilizado para la estimación de la pérdida de suelo, tiende a sobrestimar los valores reales de erosión.

OBJETIVOS GENERALES

- 1) Comparar los resultados obtenidos por los métodos directo e indirecto en la estimación de la erosión.
- 2) Comparar los resultados obtenidos por el método indirecto con dos variantes en la estimación del factor de erosividad de la precipitación (R).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Obtener los datos de erosión reales de la zona de estudio.
- b) Realizar la zonificación del área en Unidades Ambientales.
- c) Estimar el factor de erosividad de la precipitación (R) utilizando dos métodos.
- d) Estimar la erosión mediante el método indirecto, bajo las dos variantes del factor "R".

CAPÍTULO I

EROSIÓN HÍDRICA

1.1 GENERALIDADES

La definición básica de la palabra “erosión” es desgastar. Desde que la tierra fue formada, ha habido un continuo desgaste de la superficie, del cual son responsables muchos agentes (Millar *et al.*, 1975), como el agua, el viento, los animales y el ser humano, los cuales generalmente actúan en forma combinada.

Cuando la velocidad de desgaste del suelo es lo suficientemente lenta para que su velocidad de formación, por descomposición de las rocas, compense las pérdidas sufridas, se establece un equilibrio. Pero si existe una ruptura del equilibrio a favor de las acciones erosivas, el fenómeno se acelera enormemente (Fournier, 1975).

La erosión hídrica se refiere a la remoción del suelo por la acción predominante del agua; la cual es uno de los principales agentes erosivos. Por medio de la precipitación, la superficie del planeta se hidrata, esta acción es benéfica para el desarrollo de la vida. Sin embargo, cuando el ser humano altera un medio natural, privándolo de su cubierta vegetal, la lluvia generalmente pasa de ser un evento benéfico a uno destructivo. Bajo condiciones de alta perturbación ecológica se presentan enormes pérdidas de suelo, ocasionadas por el arrastre del flujo hídrico superficial (Velasco, 1991).

Hay varias formas en las cuales la erosión hídrica causa daños: pérdida de suelo, remoción de los nutrientes de las plantas, deterioro de la estructura; la capacidad productiva es reducida y los campos son divididos. Los sedimentos producidos

contaminan corrientes de agua y lagos y se acumulan en tierras bajas, canales, corrientes y depósitos. El daño más evidente causado por la erosión hídrica es la remoción de la capa superficial de éste (Troeh *et al.*, 1980).

La erosión es un proceso que se enmarca dentro de un concepto general de degradación del suelo, el cual también incluye procesos de: sodización, salinización, contaminación, compactación, encostramiento, degradación estructural, lixiviación de nutrientes y degradación de las características biológicas del suelo. La gran mayoría de estos procesos son generados por factores socioeconómicos y por la sobreexplotación de la capacidad de uso de las tierras, así como por prácticas inadecuadas de manejo del suelo y agua (Rey, 1996).

La erosión representa salidas importantes de suelo, agua y nutrientes minerales del sistema, y al mismo tiempo significa entradas de materiales en sistemas contiguos. Es por ello que la erosión no sólo debe ser vista como un factor de pérdida de fertilidad sino también como una importante fuente de degradación ambiental (Maass & García, 1990).

El proceso de erosión hídrica se puede describir así: cuando una gota de agua cae sobre la superficie del suelo ocurre una compactación y un salpicamiento. La compactación reduce el diámetro de los poros del suelo y la velocidad de infiltración. El salpicamiento lleva partículas de suelo que al caer tapan los poros del suelo reduciendo la velocidad de infiltración; al reducirse ésta, se acumula agua en la superficie y comienza a moverse en el sentido de la pendiente (Rey, 1996).

Cuando la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo llega a su punto de saturación o cuando la cantidad o intensidad de lluvia excede la velocidad de infiltración del suelo, se presenta el escurrimiento superficial (Rey, 1996).

La erosión del suelo incrementa el nivel de estrés que las plantas sufren por la disminución de la profundidad del suelo y la eficiencia del agua y los nutrientes (Guerrero *et al.*, 1999); al erosionarse la capa superficial del suelo la productividad puede perderse casi en su totalidad.

La erosión hídrica representa el principal proceso de deterioro de los suelos en México, afectando el 85% de la superficie nacional en diferentes grados (CONAZA, 1994).

La Dirección General de Conservación de Suelo y Agua, al hacer un análisis de la superficie de la República Mexicana de acuerdo al grado en que ha sido afectada por la erosión, determina que: el 35% de la superficie total son tierras no afectadas por la erosión o que muestran síntomas de erosión incipiente; el 24% presenta erosión moderada; el 26% padece de erosión acelerada; y el 15% de la superficie total, se encuentra irreversiblemente erosionada (Velasco, 1991).

1.2 ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO

1.2.1 Métodos directos

Existen varios métodos directos para la estimación de erosión hídrica, algunos son sencillos y baratos, otros son algo sofisticados y caros, pero si algo tienen en común es que son laboriosos.

Uno de estos métodos es el propuesto por el Colegio de Postgraduados (1991) denominado método de clavos y rondanas. Este método consiste en utilizar clavos de 30 cm de largo y rondanas con el orificio central mayor que el grosor del clavo; los clavos se entierran verticalmente de manera que la rondana descansa sobre la superficie del suelo y la cabeza del clavo toque ligeramente la rondana; de este modo, la rondana desciende a medida que el agua arrastra el suelo que se encuentra abajo de ella.

Existe un método muy parecido llamado método de las varillas (Rey, 1996), el cual consiste en enterrar varillas de 30 a 35 cm de largo a una profundidad de 12 a 15 cm; después de introducir las varillas, se les pintan unas marcas a ras del suelo, de manera que esta marca es el punto de referencia, para cuantificar el suelo que se ha perdido en un tiempo determinado.

El Método de las Cajas Gerlach (Rey, 1996) consta de cajas metálicas que se colocan perpendiculares al sentido de la pendiente; estas cajas poseen una pestaña, la cual se introduce de manera horizontal en el suelo a una profundidad de 1 a 2 cm. Estas cajas cuentan además con un dispositivo que colecta parte del escurrimiento superficial para análisis posteriores.

Las Parcelas de Escurrimiento (Rey, 1996) constituyen otro método, el cual consiste en delimitar un área mediante tablas ó láminas (de asbesto o de metal), que se introducen en el suelo, colocadas en el sentido de la pendiente; en la parte de abajo poseen una salida y mediante un tubo PVC es desalojado el escurrimiento superficial hacia un recipiente colector.

Diversos autores han evaluado las pérdidas de suelo, utilizando algunos de los métodos citados. Por ejemplo, Fanning (1994) estimó las tasas de erosión en pastizales

áridos en Australia durante un periodo de 10 años utilizando el método de clavos; los resultados que obtuvo muestran que las mayores tasas de erosión ocurren en superficies con surcos, en segundo lugar aparecen las superficies planas y por último las superficies con una vegetación amacollada. En este estudio el sobrepastoreo es considerado como el causante de la erosión.

Maldonado (2001) evaluó los procesos de erosión hídrica en la microcuenca de captación de la presa “La Estrella”, en el municipio de Linares, N. L., en dos temporadas de lluvia en 1999. Dicho autor utilizó igualmente el método de clavos y concluye, entre otras cosas, que la erosión promedio en la microcuenca fue de 38.6 T/ha en un año, equivalente a un arrastre de 80,607 toneladas de suelo, también afirma que la microcuenca de captación de la presa “La Estrella” se encuentra bajo un proceso acelerado de erosión hídrica.

Torres (1987) citado por Maldonado (2001) estimó valores de erosión utilizando varillas, las cuales introdujo en el suelo para calcular las pérdidas de éste en la cuenca alta del río San Marcos, Tamaulipas, obteniendo valores de erosión de 13.5 y 1,296 T/ha/año, con pendientes entre 50 y 100%.

1.2.2 Métodos indirectos

El método indirecto de uso más amplio para la predicción de la pérdida de suelo ha sido la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (USLE). Esta ecuación se desarrolló para predecir la pérdida promedio anual de suelo causada por erosión hídrica en ínter arroyuelos y arroyuelos; aunque la USLE fue diseñada como auxiliar útil para la planificación de la conservación, también puede ser un instrumento útil de investigación (Kirkby & Morgan, 1984).

La tecnología de la USLE no contemplaba las especificaciones adecuadas para aplicarse en pastizales y agostaderos hasta la reciente Ecuación Universal Revisada para la estimación de la Pérdida de Suelo (RUSLE). RUSLE es una mejora sobre la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (USLE), diseñada para utilizarse más apropiadamente en pastizales y agostadero, utilizando el producto de los mismos seis factores de la ecuación original (Lane *et al.*, 1992; citado por Pierson, 2000), con una variante en los valores aplicables al factor “C” (cobertura del suelo). La diferencia entre las dos ecuaciones mencionadas anteriormente, radica en el factor “C”, que la USLE considera como el factor de manejo de cultivos y la RUSLE como el factor de cobertura y manejo.

La Ecuación Universal Revisada para la estimación de la Pérdida de Suelo (RUSLE) es una fórmula empírica que contempla la multiplicación de seis factores: erosividad de la lluvia (R), erodabilidad del suelo (K), longitud de la pendiente (L), porcentaje de pendiente (S), cobertura del suelo (C) y el factor de prácticas de control (P), el producto obtenido de esta multiplicación es la cantidad de suelo que se pierde en T/ha/año.

El factor “R” es una definición de la erosividad como resultado de la precipitación pluvial, y se define como el producto de dos características de la lluvia tempestuosa: la energía cinética y la intensidad máxima durante 30 minutos (Kirkby & Morgan, 1984), el valor de EI_{30} es calculado sólo para tormentas que excedan los 13 mm de lluvia (Troeh *et al.*, 1980).

El factor de erodabilidad del suelo “K”, es una descripción cuantitativa de la erodabilidad inherente de un suelo determinado. Este factor refleja el hecho de que diferentes suelos se erosionan a diferentes tasas cuando los demás factores que afectan la erosión son los mismos. Se necesitan cinco parámetros para utilizar la nomografía sobre

erodabilidad del suelo: porcentaje de limos más arena muy fina, porcentaje de arena, contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad (Kirkby & Morgan, 1984).

Los efectos de la longitud y el gradiente de pendiente se representan como “L” y “S”, respectivamente; sin embargo, a menudo se evalúan como un factor topográfico único, “LS” (Kirkby & Morgan, 1984). El factor “LS” se obtiene mediante la fórmula desarrollada por Wischmeier & Smith, (1978) (citados por Troeh *et al.*, 1980).

El factor “C”, para pastizales y agostadero, varía en función de la cobertura de copa, cobertura del suelo y calidad de la superficie del suelo (Pierson, 2000).

El factor de prácticas de control de la erosión “P” es la proporción de la pérdida de suelo cuando se hace uso de alguna práctica específica en comparación con la pérdida de suelo cuando se cultiva en laderas de las colinas (Kirkby & Morgan, 1984).

Otro modelo, desarrollado más recientemente, es el Proyecto para la Predicción de la Erosión Hídrica (WEPP). Este modelo fue desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Servicio de Recursos Agrícolas (USDA-ARS) para aplicarse a todas las condiciones de pastizales y agostaderos donde ocurre erosión hídrica (Pierson, 2000).

El objetivo del WEPP fue reemplazar los modelos de erosión USLE y RUSLE, con una “nueva generación” tecnológica en la predicción de erosión hídrica (Laflen *et al.*, 1991). Sin embargo, requiere una gran cantidad de información que generalmente no está disponible, por lo que su uso es limitado.

El WEPP es un modelo basado en los procesos de erosión que operan diariamente e incorpora cambios temporales en la erodabilidad del suelo, prácticas de

manejo, aumento y disminución de la biomasa, biomasa en el suelo, altura de la planta y de la copa y grado de cobertura, en la predicción de la erosión del suelo. Este modelo proporciona opciones para el manejo de pastizales y agostaderos: pastoreo, fuego, aplicación de herbicidas y protección completa, tiene una gran flexibilidad en la representación de las condiciones y escenarios de los pastizales y agostaderos, más que los modelos empíricos USLE y RUSLE. El WEPP proporciona información espacial y temporal en el manejo de pastizales y agostaderos, pero para obtener los parámetros necesarios, se requiere de mucha información y grandes costos. Sin embargo, esta tecnología es reciente y todavía no ha sido completamente probada (Pierson, 2000).

Almaguer *et al.* (1990) evaluaron el riesgo de erosión en Tamaulipas, empleando la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (EUPS) modificada por FAO. Los resultados reportados por estos autores indican que cerca del 70% de la superficie total del estado, tiene un riesgo potencial a la erosión clasificado como moderado a muy alto.

Utilizando la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (EUPS), Curiel (1990) realizó una investigación sobre la degradación de los suelos en el estado de Jalisco. En esta investigación se jerarquizaron las zonas más susceptibles a los diferentes tipos de degradación; por ejemplo, para el municipio de Zapopan la erosión hídrica ocupa el tercer lugar en el orden de importancia de los diferentes problemas de degradación, considerándose alta en el 7% del área.

Reyes *et al.* (1990), utilizando la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo para caracterizar la erosión hídrica laminar y en arroyuelos, en Oaxaca, encontraron que los factores de longitud y grado de pendiente fueron los que más influyeron en las pérdidas de suelo en los periodos de tiempo estudiados.

González *et al.* (1990) evaluaron la pérdida de suelo en el estado de Hidalgo, México; utilizando para ello la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo. De la cuantificación de la erosión resultaron 3 grupos de sitios con diferentes niveles de erosión: erosión ligera (3 sitios), moderada (10 sitios) y alta (10 sitios).

Oropeza y Flores (1990), aplicando la ecuación FAO – PNUMA (1980), evaluaron la dinámica de la erosión hídrica en el estado de Guerrero, México; encontrando que existe una erosión fuerte (568 T/ha/año) para cuatro de las once subcuencas estudiadas, las cuales corresponden a zonas con pendientes pronunciadas donde se realizan actividades humanas (agricultura y ganadería); los autores concluyen que la erosión de la cuenca en estudio alcanza niveles muy elevados.

Palacio (1990) determinó áreas de erosión potencial en cárcavas, mediante un sistema de información geográfica, encontrando que alrededor del 50% de las cárcavas se localizan en pendientes entre 2 y 6% y el 67% se encuentra en pendientes de 2 a 8%, también encontró que los luvisoles, la agricultura y el pastoreo están relacionados a este rango de pendientes.

López-Blanco y Palacio (1995) cuantificaron el crecimiento de áreas erosionadas en cabeceras de cárcavas procesando imágenes de video; a partir de este estudio mencionan que “los procesos de avance no son continuos en el tiempo, sino que funcionan intermitentemente. A partir de los resultados mostrados se puede asumir que normalmente se presentan caídas de *paquetes* de suelo en lapsos muy cortos, sobretodo durante o inmediatamente después de la presencia de tormentas de larga duración”.

Coronato y del Valle (1993) estimaron la erosión hídrica para una cuenca cerrada en el Noreste de la Patagonia, mediante dos métodos directos (parcelas de escurrimiento

y cuantificación de sedimentos) y un método indirecto (USLE). Dichos autores reportan una similitud en los resultados obtenidos mediante los dos métodos directos utilizados, mientras que los valores de erosión obtenidos con la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo fueron mucho menores.

Mati *et al.* (2000) aplicaron la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo, para predecir el riesgo de erosión en la cuenca del Alto Ewaso Ng'iro en el norte de Kenya, mediante parcelas de erosión y levantamientos de reconocimiento, también emplearon un Sistema de Información Geográfica para calcular la pérdida de suelo y mapear el riesgo de erosión; los resultados obtenidos por ambos métodos son similares, ubicando al 36% de la cuenca en un alto riesgo de erosión.

Sancholuz (1984) citado por Maldonado (2001) utilizando la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo estimó los valores de erosión en el Estado de Veracruz, obteniendo valores entre 62 y 492 T/ha/año en cultivos de maíz, con pendientes entre 1 y 25%.

CAPÍTULO II

ÁREA DE ESTUDIO

2.1 UBICACIÓN

La microcuenca en la cual se desarrolló el presente estudio se localiza entre las coordenadas 24° 53' 57" N, 99° 52' 34" O y 24° 57' 00" N, 99° 47' 21" O; con una altura sobre el nivel del mar de 520 m en la parte más baja y 1500 m en la parte más alta (Figura 2.1). Cuenta con una superficie total de 2,288.13 hectáreas, de las cuales 55.95 ha (2.44%), corresponden a la presa "La Estrella" y las 2,232.18 ha (97.56%) restantes están conformadas por terrenos de distintos poblados: el ejido Loma Alta, el cual ocupa la mayor parte de la microcuenca; el ejido La Estrella, como segundo lugar en superficie; los ejidos San Clemente y La Gorgonia, en una menor proporción y pequeñas superficies de propiedad privada.

La microcuenca de la presa La Estrella pertenece a la región hidrológica "San Fernando-Soto La Marina" (No. 25), conocida con el nombre de "Golfo Norte" y corresponde a todas las corrientes que desembocan en el Golfo de México y que están comprendidas entre las cuencas de los ríos Bravo y Pánuco.

La cuenca del Río San Fernando tiene como subcuencas intermedias las del Río Conchos, Río San Lorenzo, Río Potosí, Río Limón y Arroyo Camacho. El área de estudio se ubica dentro de la subcuenca del Río Potosí, siendo la presa "La Estrella", con una capacidad de 3'000,000 m³, uno de los tres principales embalses de dicha subcuenca (INEGI, 1986).

Como se mencionó anteriormente, el ejido que constituye la mayor parte de la microcuenca es "Loma Alta", en esta población viven 57 familias con 5 integrantes en

promedio, dando un total de 286 personas (INEGI, 1994), las principales actividades a las que se dedican estas familias son la agricultura de temporal (principalmente de maíz, frijol y sorgo) y la ganadería caprina extensiva, algunas familias tienen vacas y borregos, pero en menor número. En las partes altas de la microcuenca, donde se encuentra el bosque de pino encino, se hace un aprovechamiento forestal por parte de algunos particulares.

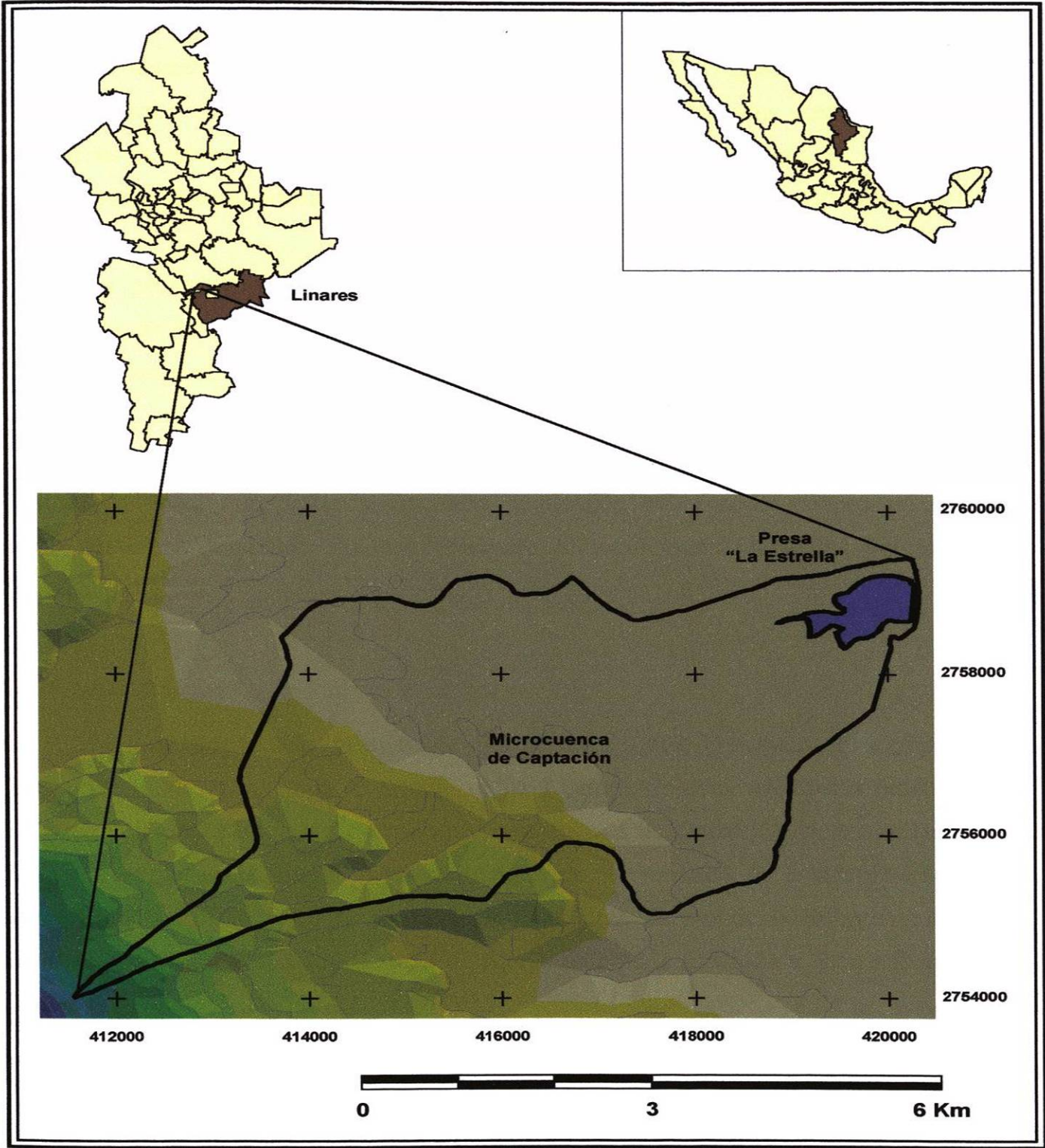


Figura 2.1.- Ubicación del área de estudio.

2.2 CLIMA

De acuerdo con los registros climatológicos para la región citrícola de Nuevo León (Cavazos & Molina, 1992), la estación climatológica más cercana al área de estudio es la estación Cabezones en el municipio de Montemorelos, N. L., localizada geográficamente en la coordenada 24° 59' 24'' N y 99° 44' 38'' O, a 460 msnm.

La precipitación promedio anual es de 871.2 mm, de acuerdo con los datos registrados de 1960 a 2000 por la Comisión Nacional del Agua, y la temperatura media máxima extrema anual es de 40.2 °C (Cavazos & Molina, 1992).

Según García (1988) la fórmula que corresponde al tipo de clima de la región es (A)C(x')(w'')a(e) que define a un clima semicálido subhúmedo extremo; descrito como un clima templado lluvioso tendiente a condiciones climáticas del grupo A (tropical lluvioso).

2.3 FISIOGRAFÍA

El área de estudio comprende porciones de dos Provincias Fisiográficas: la mayor parte se ubica en la Provincia de la Llanura Costera del Golfo Norte, en la Subprovincia de Llanuras y Lomeríos con topoformas de Lomerío Suave con Bajadas y Lomerío Suave con Llanuras. Una pequeña parte, al suroeste de la microcuenca, está ubicada en la Provincia de la Sierra Madre Oriental, dentro de la Subprovincia de la Gran Sierra Plegada con topoformas de Sierra Compleja asociada a Sierra Compleja y Lomeríos.

En algunos de los lomeríos suaves de la Subprovincia de Llanuras y Lomeríos se encuentra un tipo de suelo poco desarrollado que se denomina regosol, el cual presenta con frecuencia riesgos de erosión (INEGI, 1986).

2.4 GEOLOGÍA

El frente de la Sierra Madre Oriental está constituido por el elemento fisiográfico conocido como la Planicie Costera del Golfo, en ésta afloran sedimentos de origen marino del Cretácico Superior, los cuales están cubiertos por sedimentos continentales del Terciario y Cuaternario (López, 1980; citado por Garza, 1993).

Geológicamente, la Sierra Madre Oriental está constituida principalmente por rocas sedimentarias de la era Mesozoica que se depositaron y evolucionaron sobre un basamento Paleozoico (Garza, 1993).

2.5 GEOMORFOLOGÍA

Maldonado (2001) caracterizó la geomorfología la microcuenca de la presa “La Estrella”, mediante la digitalización de las cartas edafológica y geológica y la interpretación de las formas de relieve en fotografías aéreas, obteniendo unidades de relieve donde “pendiente suave” corresponde a los terrenos casi planos, con 2 a 5 grados; “pendiente tendida” refiriéndose a terrenos con 5 a 15 grados y “pendiente media” a terrenos con pendientes entre 15 y 35 grados.

En el estudio realizado por Maldonado (2001), se reportan siete unidades geomorfológicas para la microcuenca, además de la presa “La Estrella”, siendo el relieve con pendiente suave el predominante en la microcuenca, el cual cubre un 54% del área,

seguida de la pendiente tendida con un 25.5% y la pendiente media con un 17.2%, correspondiendo el 3.3% restante a la presa "La Estrella".

2.6 SUELO

Los tipos de suelo presentes en el área de estudio, según la carta edafológica escala 1:50,000 de INEGI (1977), son: I+Re/3 (Litosol + Regosol eutríco, textura fina), Lc+Vc/3 (Luvisol crómico + Vertisol crómico, textura fina), Re+I+Lc/3 (Regosol eutríco + Litosol + Luvisol crómico, textura fina) y Vp+Re+Lc/3 (Vertisol pélico + Regosol eutríco + Luvisol crómico, textura fina).

Los tipos de suelo encontrados en la microcuenca, así como la superficie ocupada por ellos y los porcentajes con respecto a la superficie total de la microcuenca se presentan en el Cuadro 2.1.

Cuadro 2.1.- Tipos de suelo encontrados en la microcuenca, superficie y porcentajes ocupada por ellos, con respecto al total de la microcuenca.

CLAVE	DESCRIPCIÓN	ÁREA (ha)	%
I + Re/3	Litosol, asociado con Regosol, textura fina	1164.39	50.89
Lc + Vc/3	Luvisol crómico, Vertisol crómico, textura fina	667.36	29.17
Re + I + Lc/3	Regosol eutríco, Litosol, Luvisol crómico, textura fina	291.59	12.74
Vp + Re + Lc/3	Vertisol pélico, Regosol eutríco, Luvisol crómico, textura fina	108.84	4.76
Presa	Presa "La Estrella"	55.95	2.44
TOTAL		2,288.13	100

Los tipos de suelo señalados para el área, se describen de manera breve a continuación.

Litosol

De la palabra griega *lithos* = piedra; connotativa de suelos con roca dura a muy poca profundidad. Son suelos limitados en profundidad por roca continua dura coherente dentro de los 10 cm de profundidad de la superficie. Se presentan principalmente en zonas montañosas pero pueden ocurrir en otras áreas como en superficies planas de roca dejadas desnudas por el hielo o en inselbergs (FitzPatrick, 1984).

Luvisol

De la palabra latina *luo* = lavar; connotativa de la acumulación iluvial de arcilla (FitzPatrick, 1984); es un suelo rico en nutrientes (Gutiérrez, *et al.*, 1983). Luvisol crómico: posee un horizonte B fuertemente café a rojo (FAO, 1988), es un suelo de fertilidad moderada (Gutiérrez, *et al.*, 1983).

Regosol

De la palabra griega *rhegos* = cobija, manta; connotativa del manto del material suelto (FitzPatrick, 1984), son suelos moderadamente evolucionados, en posiciones inclinadas con alto riesgo de erosión y sobre formaciones calichosas, sin aptitud agrícola, excluidos al uso intensivo, se presentan como suelos someros, limitados en profundidad por costras calizas duras (Woerner, 1990). Regosol eutrítico: del griego *eu* = bueno, fértil; con una alta saturación de bases (FAO, 1988).

Vertisol

De la palabra latina *verto* = voltear; connotativa del volteo hacia debajo de la superficie del suelo. Suelos que después de haber mezclado los 20 cm superiores, tienen 30% o más de arcilla en todos los horizontes a una profundidad no menor de 50 cm; desarrollan grietas de la superficie del suelo hacia abajo, las cuales tienen cuando menos 1 cm de ancho a una profundidad de 50 cm.

Son suelos de color oscuro con textura uniforme fina o muy fina (FitzPatrick, 1984). Vertisol pélico: suelos de color negro en la superficie (Gutiérrez, *et al.*, 1983). Vertisol crómico: del griego *chromos* = color, connotativo de suelos con colores brillantes (FAO, 1988), de color gris en la superficie, generalmente de manejo más fácil que los anteriores (Gutiérrez, *et al.*, 1983).

2.7 USO DE SUELO Y VEGETACIÓN

Los diferentes usos de suelo y vegetación que se presentan en la microcuenca son: agricultura, matorral submontano, bosque de encino, transición entre matorral submontano y bosque de encino, suelo desnudo, bosque de pino – encino y la presa “La Estrella”.

En el matorral submontano se registraron las siguientes especies: *Forestiera angustifolia* Torr. (panalero), *Condalia hoockeri* M.C. Johnst. (brasil), *Acacia farnesiana* (L.) Willd. (huizache), *Randia rhagocarpa* Standl. (crucillo), *Gymnosperma glutinosum* (Spreng.) Less. (escobilla), *Parthenium incanum* H.B.K. (mariola), *Celtis pallida* Torr. (granjeno), *Eysenhardtia texana* Scheele (vara dulce), *Croton cortesianus* H.B.K. (palillo), *Zanthoxylum fagara* (L) Sarg. (colima), *Diospyros palmeri* Scheele (chapote manzano), *Acacia rigidula* Benth. (chaparro prieto o gavia) y *Havardia palens* (Benth) Standl. (tenaza), siendo las últimas tres especies las dominantes.

En el bosque de encino se registró: *Quercus rizophylla* Weath, *Q. canbyi* Cory & Parks, y *Q. mexicana* Humb. & Bonpl.

En el área de transición entre matorral submontano y bosque de encino, se encontraron los siguientes taxa: *Randia rhagocarpa* Standl. (crucillo), *Prosopis laevigata* (Willd.) M.C. Johnst. (mezquite), *Gymnosperma glutinosum* (Spreng.) Less.

(escobilla), *Karwinskia Humboldtiana* (R. & S.) Zucc. (coyotillo), *Acacia farnesiana* (L.) Willd. (huizache), *Zanthoxylum fagara* (L.) Sarg. (colima), *Havardia pallens* (Benth) Standl. (tenaza) y *Quercus. canbyi* Cory & Parks, siendo las últimas tres las más frecuentes.

En el área catalogada como suelo desnudo (3 a 8% de cobertura vegetal según Hernández, 1997), es característico observar especies de vegetación secundaria, como *Karwinskia humboldtiana* (R. & S.) Zucc. (coyotillo), *Croton ciliatoglandulosus* Ort., *Croton incanus* H.B.K. así como *Acacia farnesiana* (L.) Willd. (huizache), *Acacia rigidula* Benth. (chaparro prieto o gavia), y elementos representativos de la familia Asteraceae, como *Thymophylla pentachaeta* (DC.) Small. var. *pentachaeta*, *Calyptracarpus vialis* Less., *Tragia ramosa* Torr., *Euphorbia prostrata* Ait., *Phylla incisa* Small., *Malvastrum coromandelianum* (L.) Gke., *Bouteloua repens* (Kunth) Scribn. & Merr. y *Aristida purpurea* Nutt. (Castillo, 2000).

Esta área se encuentra cerca de la población del ejido “Loma Alta”, donde se pueden observar cárcavas de un tamaño considerable, las cuales están en un proceso dinámico. Maldonado (2001) reporta un incremento de 81 a 125 hectáreas (54%) del área cubierta por cárcavas en un periodo de 24 años (1972 a 1996), cabe destacar que la mayor parte de esta área se localiza sobre suelo tipo Regosol (INEGI, 1977).

En el bosque de pino—encino se registraron las siguientes especies: *Pinus teocote* Schl. & Cham., *Quercus rizophylla* Weath, *Q. canbyi* Cory & Parks y *Arbutus xalapensis* H.B.K. (madroño).

2.8 FAUNA

Maldonado (2001) reporta para el área de estudio la presencia de las siguientes especies (incluyendo la fauna doméstica): *Odocoileus virginianus* (venado), *Procyon lotor* (mapache), *Puma concolor* (puma), *Canis latrans* (coyote), *Dasyopus novemcinctus* (armadillo), *Mustela frenata* (comadreja), *Bos taurus* (vacas), *Equus* spp. (mulas y burros), *Equus equus* (caballos), *Sus scrofa* (puerco salvaje), *Capra hircus* (cabras), *Ovis aries* (borregos), *Canis familiaris* (perros), *Crotalus lepidus* (v. cascabel), *Micrurus* sp. (v. coralillo), *Meleagris gallopavo* (guajolote), *Cathartes aura* (aura), *Aphelocoma coerulescens* (chara pechirrayada), *Buteo jamaicensis* (aguililla), *Ortalis vetula* (chachalaca), *Rhynchopsitta terrisi* (cotorra), *Coragyps atratus* (zopilote).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 DELIMITACIÓN DE UNIDADES AMBIENTALES

El primer paso consistió en delimitar unidades homogéneas al interior de la microcuenca que permitieran la evaluación de la erosión mediante el método indirecto.

La delimitación de dichas unidades se realizó basándose en el tipo de suelo, pendiente, uso de suelo y vegetación, ya que éstas son las variables requeridas para aplicar las ecuaciones de estimación de pérdida de suelo que aquí se utilizaron. Para la delimitación se usaron las cartas topográfica (INEGI, 2000) y edafológica (INEGI, 1977) G14C57 correspondientes a Hualahuises, escala 1:50,000, así como fotografías aéreas del área de estudio (G14-11, L158, No. 14 y 15), escala 1:75,000, para el año 1996. Estas últimas fueron utilizadas para la identificación y delimitación de los usos de suelo y vegetación, debido a que las cartas de INEGI, sobre este tema, presentan datos obsoletos.

La información correspondiente a cada variable (tipo de suelo, pendiente y vegetación) fue digitalizada empleando el programa de cómputo Arc/Info® y se generaron los mapas mediante el programa Arc-View®. Estos mapas fueron cruzados a fin de obtener unidades ambientales homogéneas, en las cuales se estimó la erosión hídrica.

3.2 ESTIMACIÓN DE EROSIÓN HÍDRICA POR EL MÉTODO INDIRECTO

Para estimar la erosión hídrica en el área de estudio, con un método indirecto, se utilizó la Ecuación Universal Revisada para la estimación de la Pérdida de Suelo

(RUSLE). La fórmula utilizada (Lane *et al.*, 1992; citado por Pierson, 2000) se describe a continuación; así como la forma en que se obtuvieron los valores para cada una de las variables.

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

Donde;

A = pérdida de suelo (T/ha)

R = índice de erosividad asociado a la lluvia

K = factor de erodabilidad del suelo

L = longitud de la pendiente

S = porcentaje de pendiente

C = cobertura y manejo

P = prácticas de control de la erosión

3.2.1 Factor de erosividad de la precipitación "R"

Para obtener el valor del factor "R", tal y como lo pide la fórmula original, se necesita contar con una estación climatológica en el área de estudio o muy cercana a ella, así como disponer de un registro de intensidades y tiempos de las lluvias por varios años o al menos de los eventos de lluvia del año para el que se hace el estudio.

Dado que se carece de estos datos, el factor "R" se estimó por dos métodos diferentes y los resultados de cada método fueron comparados y discutidos. El primer método es el recomendado por FAO (1979), el cual utiliza el índice de Fournier:

$$R = \frac{\sum P^2}{\bar{P}}$$

Donde;

R = índice de Fournier

P = precipitación promedio mensual

\bar{P} = precipitación promedio anual

También se empleó el método que describe a “R” como la mitad de la precipitación promedio anual en milímetros (varios autores, citados por Young, 1989).

3.2.2 Factor de erodabilidad del suelo “K”

Para obtener los parámetros necesarios en la estimación del factor de erodabilidad del suelo “K”, se analizaron muestras de suelo que ya se tenían para algunos de los sitios, los cuales fueron ubicados siguiendo un diseño sistemático estratificado y se obtuvieron en campo las muestras de varios sitios faltantes para el área de estudio. Las muestras de suelo fueron tomadas a una profundidad de 30 cm y secadas en estufa a una temperatura de 105°C, hasta obtener un peso constante.

Una vez que el suelo estuvo seco, se procedió a deshacer los terrones con un mazo, se sacaron las hojas, raíces y ramillas que tuviera el suelo y se pasó por una criba de 2 mm, para tener el material listo para los análisis en el laboratorio.

Para estimar los porcentajes de limo y arena, es necesario determinar la textura del suelo, para esto se empleó la prueba al tacto (Siebe *et al.*, 1996) (Anexo 1) y se verificaron algunas de las muestras mediante análisis de laboratorio (método Bouyoucos). Una vez que se tuvieron las texturas de cada muestra de suelo, se procedió a estimar los porcentajes de limo y arena utilizando el triángulo de texturas (Anexo 2).

El porcentaje de materia orgánica se determinó utilizando el proceso de combustión húmeda y titulación según Walkley/Black (modificado) en el cual se hace la digestión de la materia húmeda con ácido sulfúrico (H_2SO_4), oxidación del carbono con dicromato de potasio 0.07 M ($K_2Cr_2O_7$) y titulación del exceso de dicromato con sulfato ferroso 0.2 M ($FeSO_4 \bullet 7 H_2O$) (Woerner, 1989). Los mililitros que sobran después de la titulación se sustituyen en la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Materia Orgánica} = 1.343 * (B - M) * 0.4$$

$$1.343 = \left[\left(\frac{12}{4000} * \frac{100}{77} * 100 \right) / 0.5 \right] / 0.58$$

Donde;

B = ml blanco

M = ml muestra

0.4 = normalidad de la solución de dicromato de potasio y de la solución del sulfato ferroso

12/4000 = peso equivalente del carbono en mg

100/77 = factor de recuperación del carbono según Walkley / Black

0.5 = peso de la muestra en g

0.58 = porcentaje medio de carbono que supuestamente contiene la materia orgánica

Por último, la estructura y permeabilidad del suelo, se consultaron en la carta edafológica Hualahuises G14C57, escala 1:50,000 (INEGI, 1977).

Una vez obtenidos los parámetros necesarios para estimar el factor “K”, se empleó el nomograma desarrollado por Wischmeier *et al.* (1971) (citado por Troeh *et al.*, 1980) para la determinación de la erodabilidad del suelo (Anexo 3).

3.2.3 Factor de longitud de pendiente “L” y factor de gradiente de pendiente “S”

La obtención de la longitud de pendiente “L” y del porcentaje de ésta “S” se realizó manualmente, empleando la carta topográfica Hualahuises G14C57, escala 1:50,000 (INEGI, 2000); con una regla se midió la distancia entre cada curva de nivel y debido a que las curvas no presentan la misma distancia entre un punto y otro, se tomaron varias medidas para cada par de curvas y se obtuvo el promedio de la distancia entre ellas.

Los valores de altitud representada por cada curva, así como la distancia entre ellas, permitieron obtener el gradiente de pendiente mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de pendiente} = (H/D) * 100$$

Donde;

H = Altura (m)

D = Distancia (m)

Con los datos de longitud y gradiente de pendiente se estimaron los valores del factor topográfico “LS” mediante el uso de la siguiente fórmula (Wischmeier & Smith, 1978; citados por Troeh *et al.*, 1980):

$$LS = \left(\frac{L}{22.1} \right)^m (0.065 + 0.045s + 0.0065s^2)$$

Donde;

L = longitud de la pendiente

22.1 = longitud de una parcela estándar (m)

$m = 0.5$ si $s \geq 5\%$

$m = 0.4$ si $3\% < s < 5\%$

$m = 0.3$ si $1 \leq s \leq 3\%$

$m = 0.2$ si $s < 1\%$

S = pendiente en porcentaje

3.2.4 Factor de cultivo y manejo ó factor de cobertura y manejo "C"

Los valores del factor "C" para las áreas agrícolas se estimaron tomando en cuenta el rango de valores para maíz, sorgo y mijo, reportado por Roose (1977) citado por Kirkby & Morgan (1984), que va de 0.4 – 0.9; donde se asigna el valor de 0.4 a la máxima fase de cobertura del cultivo y el valor de 0.9 a la fase de menor cobertura del cultivo, estimando así un valor de $C = 0.65$; este valor es cercano al reportado por Curiel (1990) para cultivo de maíz en el estado de Jalisco.

Los diferentes usos de suelo y vegetación se identificaron y delimitaron utilizando fotografías aéreas del área de estudio, escala 1:75,000, para el año de 1996. Posteriormente se realizaron muestreos en campo con la finalidad de corroborar la delimitación, así como para tomar los datos cuantitativos de la cobertura vegetal.

La cobertura vegetal fue determinada mediante el método de puntos de contacto modificado (Villalón, *et al.*, 1991), utilizando transectos de 15 m de longitud. Los muestreos se realizaron mediante recorridos en el área de estudio; en dichos recorridos se hicieron transectos al azar para cada estrato con ayuda de una cinta métrica y, mediante una baliza colocada de manera vertical en cada punto de muestreo, se

registraron las especies de diferentes estratos que tocaban la baliza, así como el sustrato que tocaba la base de ésta, también se registraron datos de referencia como: fecha, área, coordenadas, etc. (Anexo 4). Se realizó un total de 14 transectos (2 en cada unidad delimitada en un principio).

Con los valores de cobertura relativos para los diferentes estratos, se obtuvieron los valores de “C” a partir del cuadro utilizado por el Servicio de Conservación del Suelo de los Estados Unidos (U.S. Soil Conservation Service, citado por Kenneth *et al.* 1993) (Anexo 5) y se realizó una nueva estratificación basada en la igualdad de los valores de “C”.

3.2.5 Factor de prácticas de control “P”

El valor para la variable prácticas de control (P) va de 1 a 0 dependiendo de la cantidad de prácticas de control que se realicen en el área. Mediante las visitas realizadas al área de estudio se pudo observar que en el lugar no se realiza ninguna práctica de conservación de suelo, por lo que se le asignó un valor de 1 al factor “P”.

3.3 ESTIMACIÓN DE EROSIÓN HÍDRICA POR EL MÉTODO DIRECTO

Los datos de erosión hídrica obtenidos mediante el método directo, utilizados en el presente trabajo, fueron tomados de Maldonado (2001). Dicho autor estimó la pérdida de suelo en la microcuenca de la presa “La Estrella”, mediante el método directo de clavos y rondanas (Colegio de Postgraduados, 1991).

Maldonado (2001) delimitó unidades geomorfológicas dentro del área de estudio (Cuadro 3.1 y Figura 3.1) y distribuyó sistemáticamente un total de 44 clavos en estas, realizando mediciones en dos temporadas de lluvias.

Cuadro 3.1.- Unidades geomorfológicas y superficie de cada una reportadas por Maldonado (2001), para el área de estudio.

CLAVE	DESCRIPCIÓN	SUPERFICIE (ha)
SULULUT	Pendiente suave, luvisol, lutita	620.65
TELILUT	Pendiente tendida, litosol, lutita	570.81
MELILUT	Pendiente media, litosol, lutita	398.77
SURELUT	Pendiente suave, regosol, lutita	284.27
SULILUT	Pendiente suave, litosol, lutita	209.62
SUVELUT	Pendiente suave, vertisol, lutita	133.73
PRESA	Presa "La Estrella"	77.02
TELULUT	Pendiente tendida, luvisol, lutita	18.13
TOTAL		2,313

3.4 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DIRECTO E INDIRECTO

Los resultados de erosión hídrica para la microcuenca de captación de la presa "La Estrella", obtenidos por los métodos indirectos, se compararon con los resultados obtenidos por Maldonado (2001) mediante el método directo de clavos y rondanas (Colegio de Postgraduados, 1991) para la misma área de estudio. Los resultados de los métodos indirectos fueron también comparados entre sí.

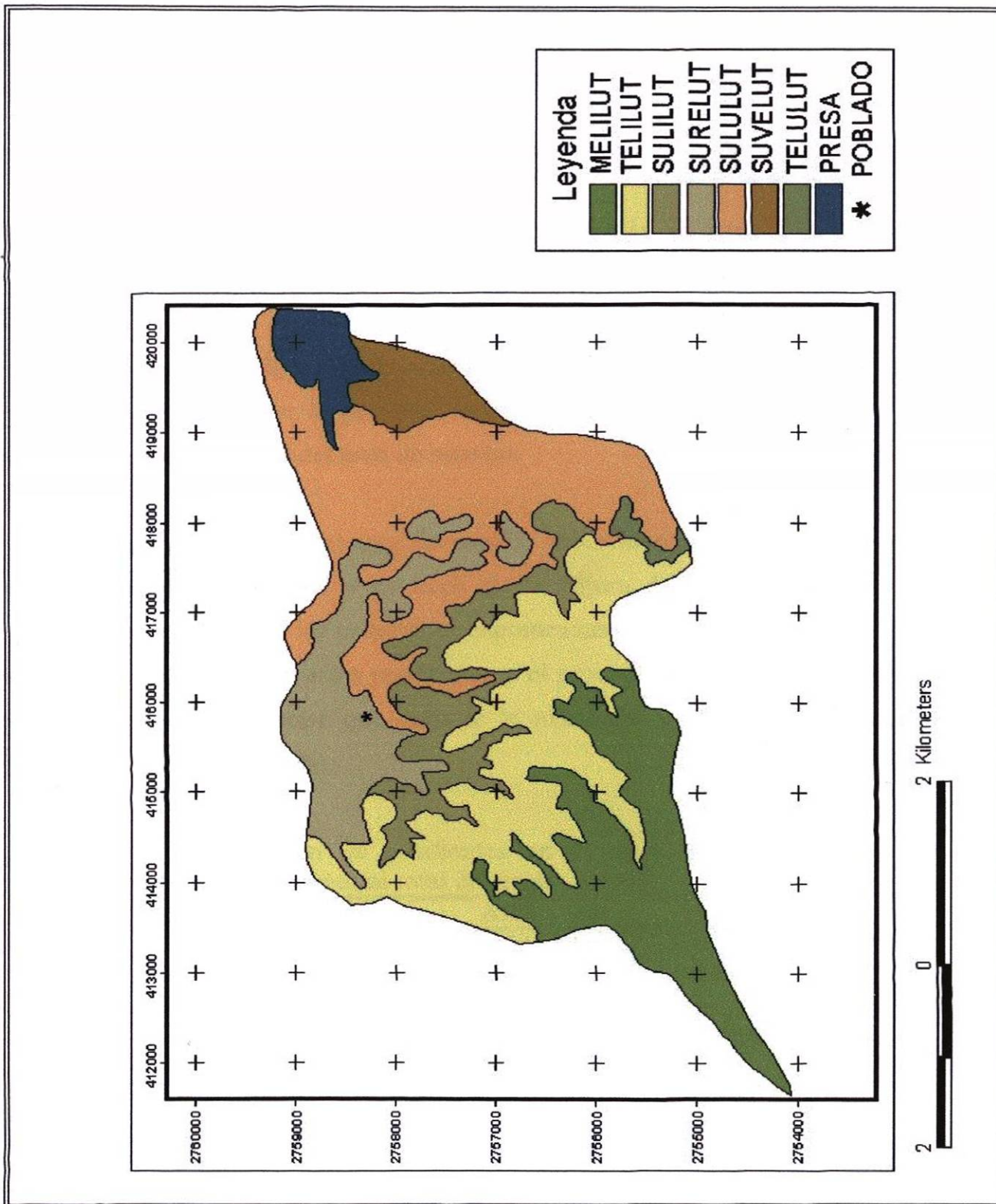


Figura 3.1.- Mapa de las Unidades Geomorfológicas de la microcuenca, (tomado de Maldonado, 2001).

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 DELIMITACIÓN DE LA MICROCUENCA EN UNIDADES AMBIENTALES

Para la delimitación de las Unidades Ambientales se estratificó el área de estudio basándose en el tipo de suelo, pendientes y uso de suelo y vegetación.

El mapa de la Figura 4.1 muestra la estratificación de la microcuenca por tipos de suelo, donde es evidente la predominancia del suelo tipo Litosol, el cual se presenta prácticamente en la mitad del área de estudio.

De la delimitación del área de estudio basándose en el porcentaje de pendiente, se desprende el Cuadro 4.1 y el mapa de la Figura 4.2. El Cuadro 4.1 muestra una clasificación detallada de las pendientes encontradas en la microcuenca, así como el área ocupada por cada una de estas pendientes y el porcentaje ocupado con respecto al total del área; se puede apreciar que más de la mitad de la microcuenca se encuentra en pendientes bajas (de 2 a 4%).

Cuadro 4.1.- Clasificación de pendientes en la microcuenca, superficie ocupada y porcentaje con respecto al total del área.

PENDIENTE (%)	ÁREA (ha)	%
2	1241.63	54.26
4	125.38	5.48
10	27.98	1.22
11	470.48	20.56
14	31.73	1.40
19	244.93	10.70
22	90.05	3.94
Presas "La Estrella"	55.95	2.44
TOTAL	2,288.13	100

La estratificación del área de estudio de acuerdo al uso de suelo y vegetación, así como la superficie ocupada por cada uno de ellos y sus porcentajes con respecto a la superficie total de la microcuenca se presentan en el Cuadro 4.2 y en la Figura 4.3.

Cuadro 4.2.- Uso de suelo y vegetación encontrada en la microcuenca, superficie ocupada y porcentajes con respecto a la superficie total.

USO DE SUELO Y VEGETACIÓN	ÁREA (ha)	%
Agricultura	674.55	29.48
Matorral submontano	475.45	20.78
Bosque de encino	435.21	19.02
Transición	259.44	11.33
Suelo desnudo	230.37	10.07
Bosque de pino – encino	157.16	6.88
Presa “La Estrella”	55.95	2.44
TOTAL	2,288.13	100

El uso de suelo que predomina en la microcuenca es la agricultura, seguida por la vegetación de matorral submontano.

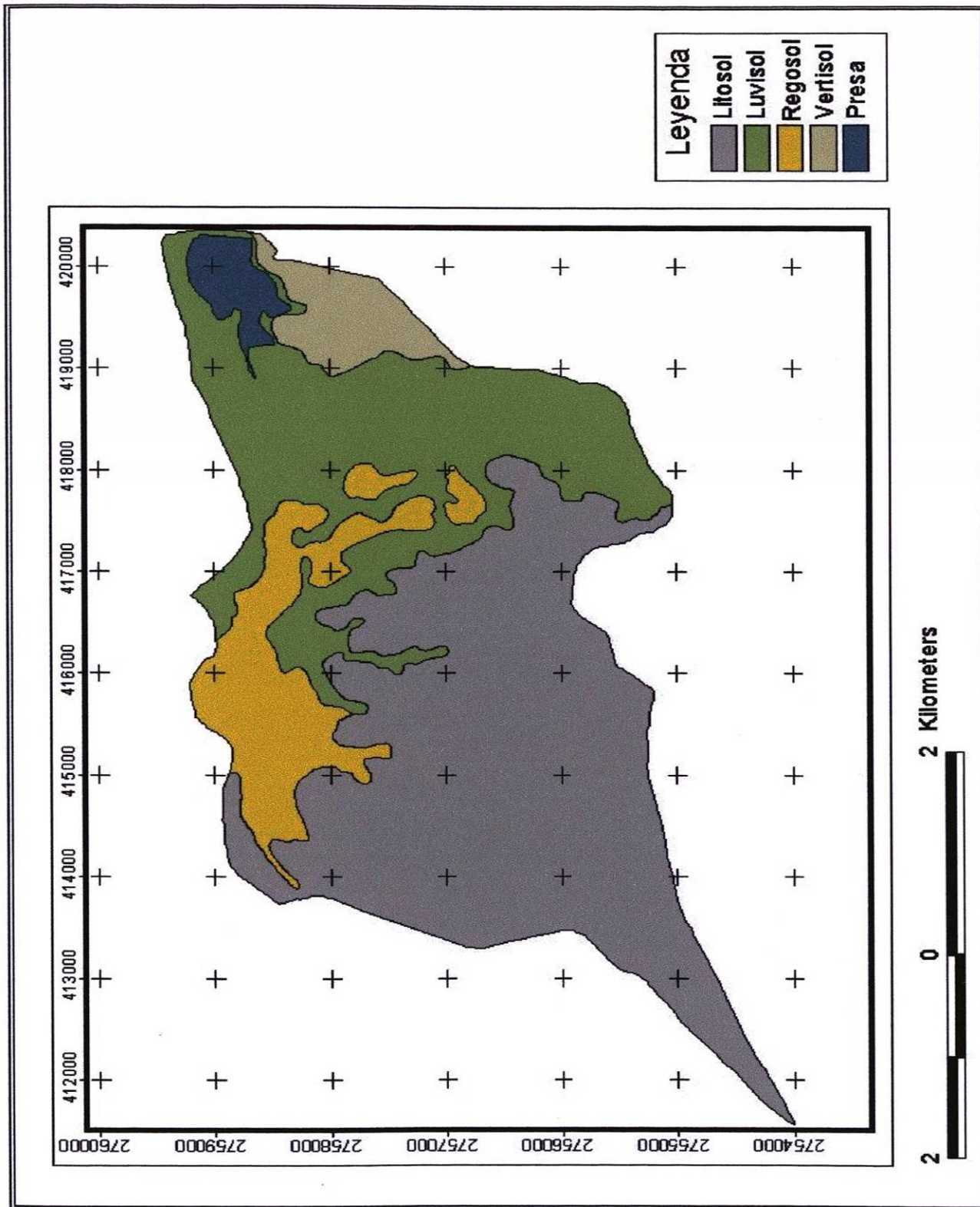


Figura 4.1.- Mapa de los tipos de suelo presentes en el área de estudio.

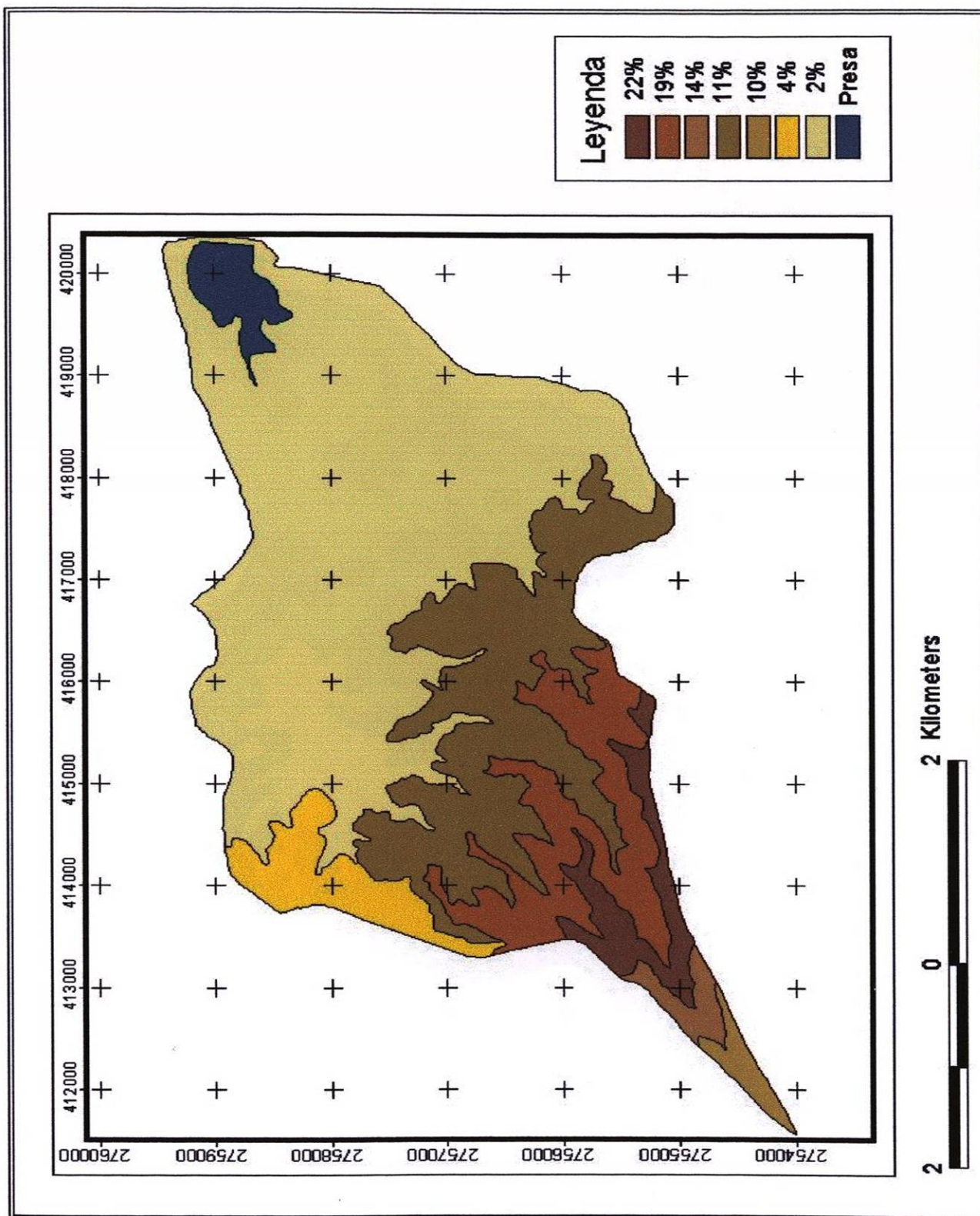


Figura 4.2.- Delimitación de pendientes en la microcuenca.

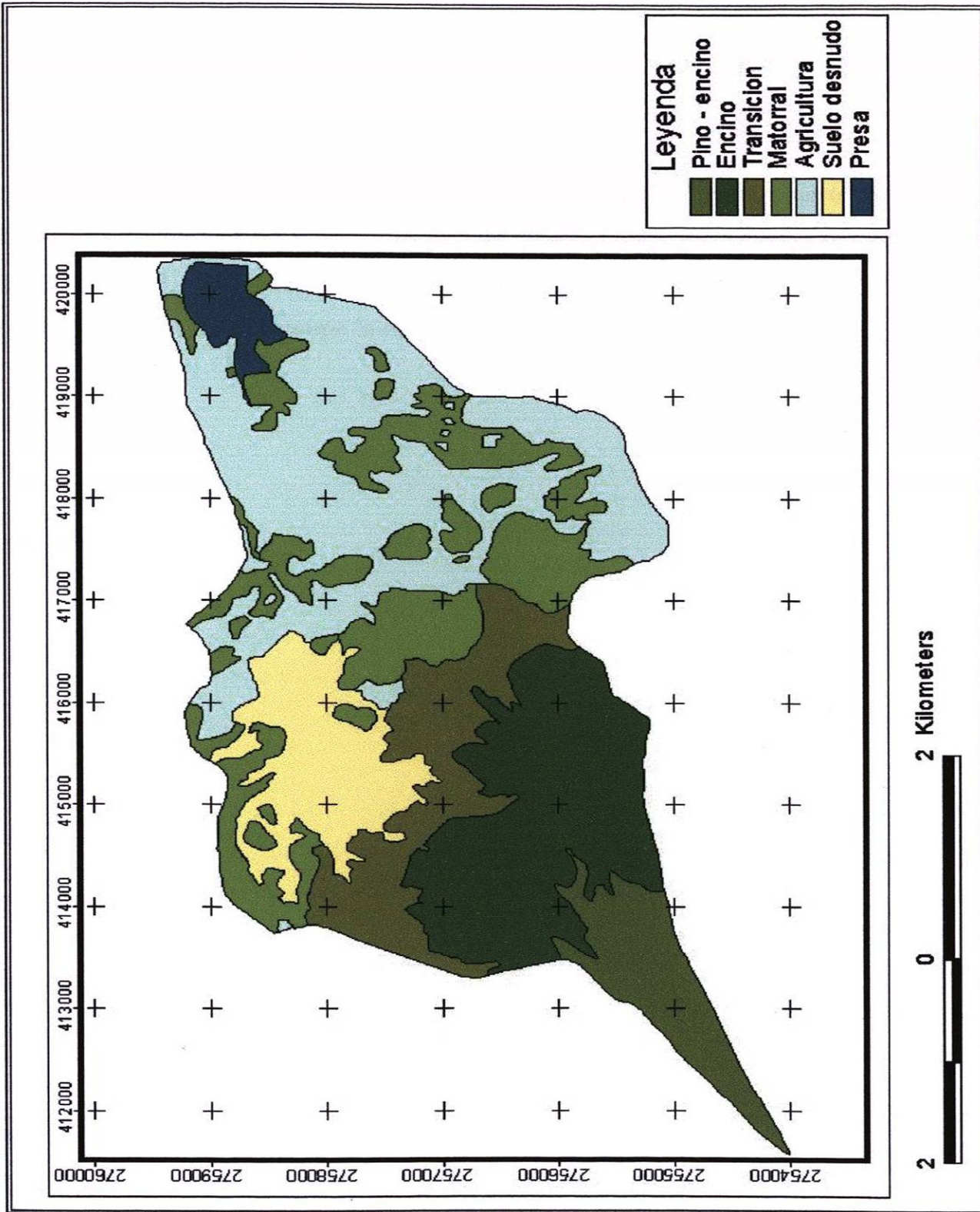


Figura 4.3.- Estratificación de la microcuenca de acuerdo al uso de suelo y vegetación.

Una vez elaborados los mapas de tipos de suelos, pendientes y uso de suelo y vegetación se superpusieron para formar el mapa de las Unidades Ambientales (Figura 4.4).

Las Unidades Ambientales resultantes de la estratificación en el área de estudio fueron 33, incluyendo la presa “La Estrella”; estas Unidades Ambientales se muestran en el Cuadro 4.3, siendo la Unidad de luvisol, con agricultura y una pendiente del 2% (Clave Luagri2), la que ocupa la mayor área en la microcuenca estudiada.

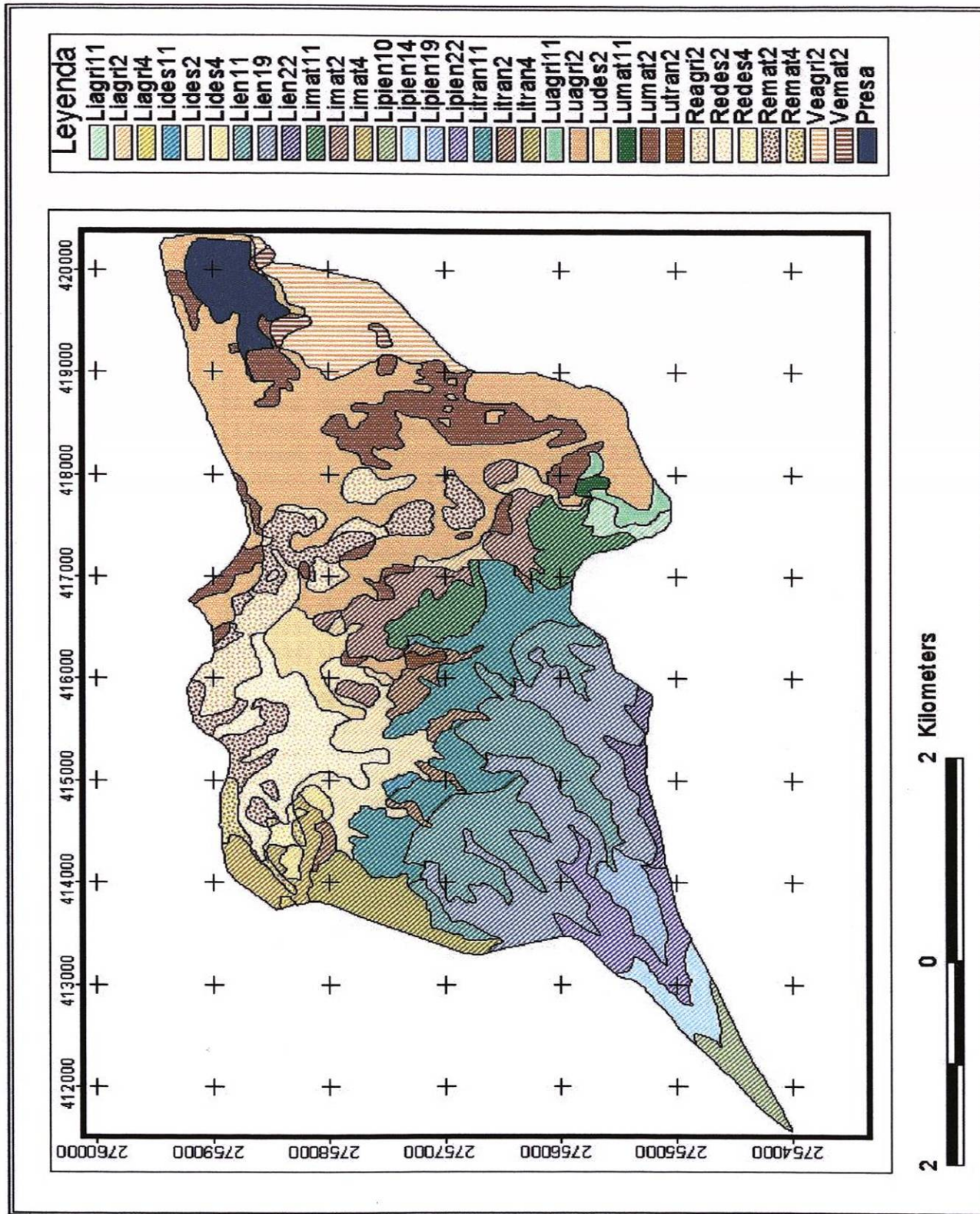


Figura 4.4.- Delimitación de la microcuenca por Unidades Ambientales.

Cuadro 4.3.- Superficie ocupada por cada una de las Unidades Ambientales en la microcuenca.

CLAVE	DESCRIPCIÓN	ÁREA (ha)	%
Luagri2	Luvisol, agricultura, pendiente 2%	447.09	19.54
Lien19	Litosol, B. de encino, pendiente 19%	214.06	9.36
Lien11	Litosol, B. de encino, pendiente 11%	197.69	8.64
Litran11	Litosol, transición, pendiente 11%	159.25	6.96
Lumat2	Luvisol, matorral, pendiente 2%	157.27	6.87
Veagri2	Vertisol, agricultura, pendiente 2%	98.33	4.30
Remat2	Regosol, matorral, pendiente 2%	97.48	4.26
Redes2	Regosol, suelo desnudo, pendiente 2%	96.02	4.20
Limat2	Litosol, matorral, pendiente 2%	78.08	3.41
Reagri2	Regosol, agricultura, pendiente 2%	76.80	3.36
Limat11	Litosol, matorral, pendiente 11%	76.54	3.35
Lides2	Litosol, suelo desnudo, pendiente 2%	74.20	3.24
Lipien22	Litosol, B. de pino-encino, pendiente 22%	66.59	2.91
Litran4	Litosol, transición, pendiente 4%	56.26	2.46
Litran2	Litosol, transición, pendiente 2%	39.94	1.75
Ludes2	Luvisol, suelo desnudo, pendiente 2%	39.89	1.74
Limat4	Litosol, matorral, pendiente 4%	36.03	1.57
Lipien14	Litosol, B. de pino-encino, pendiente 14%	31.73	1.39
Lipien19	Litosol, B. de pino-encino, pendiente 19%	30.87	1.35
Lipien10	Litosol, B. de pino-encino, pendiente 10%	27.98	1.22
Lien22	Litosol, B. de encino, pendiente 22%	23.46	1.03
Liagri2	Litosol, agricultura, pendiente 2%	22.02	0.96
Remat4	Regosol, matorral, pendiente 4%	15.52	0.68
Luagri11	Luvisol, agricultura, pendiente 11%	15.11	0.66
Liagri11	Litosol, agricultura, pendiente 11%	14.17	0.62
Lides4	Litosol, suelo desnudo, pendiente 4%	10.77	0.47
Vemat2	Vertisol, matorral, pendiente 2%	10.51	0.46
Redes4	Regosol, suelo desnudo, pendiente 4%	5.76	0.25
Lumat11	Luvisol, matorral, pendiente 11%	4.00	0.17
Lutran2	Luvisol, transición, pendiente 2%	4.00	0.17
Lides11	Litosol, suelo desnudo, pendiente 11%	3.72	0.16
Liagri4	Litosol, agricultura, pendiente 4%	1.02	0.04
Presa	Presa "La Estrella"	55.95	4.45
TOTAL		2288.13	100

4.2 ESTIMACIÓN DE EROSIÓN HÍDRICA MEDIANTE EL MÉTODO INDIRECTO

Los datos de la pérdida de suelo se obtuvieron mediante la Ecuación Universal Revisada para la estimación de la Pérdida de Suelo (RUSLE) (Lane *et al.* 1992; citado por Pierson, 2000); el valor de los factores utilizados en la fórmula para cada una de las Unidades Ambientales se muestran en el Cuadro 4.4.

4.2.1 Estimación de la pérdida de suelo mediante el método recomendado por FAO

Para la estimación de la pérdida de suelo, utilizando el índice de Fournier (FAO, 1979), se consultaron los datos de 1960 – 2000 registrados por la Comisión Nacional del Agua, para la estación hidroclimatológica “Cabezones”, del municipio de Montemorelos, N. L. por ser la más cercana al área de estudio; con estos datos se estimó un valor para “R” de 110.26, (Cuadro 4.4) que al ser incluido en fórmula RUSLE, junto con los otros factores, permitió estimar los valores de erosión hídrica (Cuadro 4.5).

4.2.2 Estimación de la pérdida de suelo mediante el índice de P/2

Para estimar la pérdida de suelo, mediante el índice de P/2, se obtuvo el promedio de las precipitaciones anuales, utilizando los datos de 1960 – 2000 para la estación hidroclimatológica “Cabezones”, del municipio de Montemorelos, N. L. proporcionados por la Comisión Nacional del Agua. El valor promedio de precipitación estimado fue de 871.2 mm/año, que al ser dividido entre dos, da un valor de 435.6 para el factor “R” (Cuadro 4.4). La pérdida de suelo estimada mediante éste método se muestra en el Cuadro 4.5.

Cuadro 4.4.- Valores de los factores utilizados para calcular erosión en cada Unidad Ambiental. R = erosividad de la lluvia, K = erodabilidad del suelo, LS = longitud y porcentaje de pendiente, C = cobertura y manejo.

CLAVE	AREA (ha)	R (FAO)	R (P/2)	K (T/J)	LS	C	P
Luagri2	447.09	110.26	435.6	0.54	0.78	0.65	1
Lumat2	157.27	110.26	435.6	0.54	0.78	0.0885	1
Remat2	97.48	110.26	435.6	0.58	0.78	0.0885	1
Reagri2	76.80	110.26	435.6	0.58	0.78	0.65	1
Redes2	96.02	110.26	435.6	0.58	0.78	1	1
Remat4	15.52	110.26	435.6	0.58	1.22	0.0885	1
Limat4	36.03	110.26	435.6	0.87	1.22	0.0885	1
Veagri2	98.33	110.26	435.6	0.5	0.78	0.65	1
Vemat2	10.51	110.26	435.6	0.5	0.78	0.0885	1
Redes4	5.76	110.26	435.6	0.58	1.22	1	1
Ludes2	39.89	110.26	435.6	0.54	0.78	1	1
Lides4	10.77	110.26	435.6	0.87	1.22	1	1
Liagri4	1.02	110.26	435.6	0.87	1.22	0.65	1
Lides2	74.20	110.26	435.6	0.87	0.78	1	1
Litran4	56.26	110.26	435.6	0.87	1.22	0.068	1
Litran2	39.94	110.26	435.6	0.87	0.78	0.068	1
Limat2	78.08	110.26	435.6	0.87	0.78	0.0885	1
Liagri2	22.02	110.26	435.6	0.87	0.78	0.65	1
Litran11	159.25	110.26	435.6	0.87	8.69	0.068	1
Lides11	3.72	110.26	435.6	0.87	8.69	1	1
Limat11	76.54	110.26	435.6	0.87	8.69	0.0885	1
Lien11	197.69	110.26	435.6	0.56	8.69	0.017	1
Lutran2	4.00	110.26	435.6	0.54	0.78	0.068	1
Lien19	214.06	110.26	435.6	0.56	16	0.017	1
Lipien22	66.59	110.26	435.6	0.56	18.96	0.034	1
Lumat11	4.00	110.26	435.6	0.54	8.69	0.0885	1
Luagri11	15.11	110.26	435.6	0.54	8.69	0.65	1
Liagri11	14.17	110.26	435.6	0.87	8.69	0.65	1
Lipien19	30.87	110.26	435.6	0.56	16	0.034	1
Lien22	23.46	110.26	435.6	0.56	18.96	0.017	1
Lipien14	31.73	110.26	435.6	0.56	11.34	0.034	1
Lipien10	27.98	110.26	435.6	0.56	7.84	0.034	1
Presa	55.95						
TOTAL	2288.13						

Cuadro 4.5.- Pérdida de suelo estimada para cada Unidad Ambiental, utilizando las dos variantes del método indirecto.

UNIDAD AMB.		FAO		P/2	
CLAVE	AREA (ha)	T/ha/AÑO	TONELADAS	T/ha/AÑO	TONELADAS
Luagri2	447.09	30.19	13496.26	119.26	53319.16
Lumat2	157.27	4.11	646.39	16.24	2553.67
Remat2	97.48	4.41	430.33	17.44	1700.08
Reagri2	76.80	32.42	2490.24	128.09	9838.10
Redes2	96.02	49.88	4789.64	197.07	18922.26
Remat4	15.52	6.90	107.19	27.28	423.49
Limat4	36.03	7.02	253.10	27.75	999.91
Veagri2	98.33	27.95	2748.45	110.42	10858.18
Vemat2	10.51	3.81	39.99	15.03	157.99
Redes4	5.76	78.02	449.72	308.23	1776.68
Ludes2	39.89	46.44	1852.42	183.47	7318.27
Lides4	10.77	79.37	854.99	313.54	3377.76
Liagri4	1.02	51.59	52.72	203.80	208.27
Lides2	74.20	50.74	3765.14	200.46	14874.81
Litran4	56.26	5.40	303.63	21.32	1199.53
Litran2	39.94	3.45	137.80	13.63	544.39
Limat2	78.08	4.49	350.65	17.74	1385.29
Liagri2	22.02	32.98	726.13	130.30	2868.68
Litran11	159.25	38.44	6121.60	151.87	24184.38
Lides11	3.72	565.31	2103.29	2233.36	8309.40
Limat11	76.54	50.03	3829.49	197.65	15129.03
Lien11	197.69	9.61	1899.83	37.97	7505.57
Lutran2	4.00	3.16	12.64	12.48	49.92
Lien19	214.06	17.69	3787.66	69.91	14963.78
Lipien22	66.59	41.94	2792.34	165.68	11031.58
Lumat11	4.00	45.79	183.23	180.90	723.89
Luagri11	15.11	336.31	5082.13	1328.66	20077.79
Liagri11	14.17	367.45	5208.52	1451.69	20577.10
Lipien19	30.87	35.39	1092.50	139.81	4316.12
Lien22	23.46	20.97	491.96	82.84	1943.57
Lipien14	31.73	25.08	795.96	99.09	3144.57
Lipien10	27.98	17.34	485.13	68.51	1916.57
TOTAL	2232.18	30.19	67381.05	119.26	266199.77

La Unidad Ambiental Luagri2 presentó la mayor pérdida de suelo en ambas variantes del método indirecto (Cuadro 4.5), debido a que esta Unidad Ambiental ocupa la mayor parte de la microcuenca; sin embargo, la Unidad Ambiental (UA) que presenta mayor erosión por unidad de superficie es Lides11, esto se debe principalmente a que dicha UA tiene un valor de $C=1$ el cual corresponde a un suelo desprovisto de vegetación. Si bien la tasa de erosión en esta UA también se ve afectada por la pendiente del área (11%), es de notar que otras unidades con igual o mayor pendiente, mostraron tasas de erosión menores.

Ambas variantes del método indirecto coinciden en señalar las mismas UA de mayor pérdida de suelo y de mayor tasa de erosión; sin embargo, los valores estimados con el índice de $P/2$ son cuatro veces el valor estimado por el índice de Fournier.

4.3 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DIRECTO E INDIRECTO

A fin de comparar los valores de erosión estimados por los métodos directo e indirecto, fue necesario agrupar los polígonos de las UA determinadas en el presente trabajo, dentro de las Unidades Geomorfológicas delimitadas por Maldonado (2001); la manera en que se agruparon se muestra en el Anexo 6.

Después de agrupar las UA en Unidades Geomorfológicas, se estimó la erosión total para cada unidad, así como la pérdida de suelo por unidad de superficie. Los resultados de la estimación de la pérdida de suelo mediante el método indirecto, así como los resultados del método directo obtenidos por Maldonado (2001) se muestran en el Cuadro 4.6 y en la gráfica de la Figura 4.5.

Cuadro 4.6.- Toneladas de suelo perdidas (totales y por hectárea) para cada Unidad Geomorfológica de la microcuenca, estimadas por los diferentes métodos. M. D. = método directo, FAO = método indirecto propuesto por FAO, P/2 = método indirecto donde $R = \text{Precipitación}/2$.

UNIDAD GEO.		TONELADAS			T/ha/AÑO		
CLAVE	ÁREA	M. D.	FAO	P/2	M. D.	FAO	P/2
MELILUT	398.77	8909	9446	37316	22	24	95
TELILUT	570.81	17952	20515	81047	31	38	149
SULILUT	209.62	8156	4980	19673	39	23	92
SURELUT	284.28	28379	8267	32661	100	28	112
SULULUT	620.65	17212	13974	55207	28	23	92

La unidad geomorfológica que presentó la mayor tasa de erosión, de acuerdo con la estimación del método directo, fue SURELUT (100 T/ha/año); mientras que las dos variantes del método indirecto estimaron la mayor tasa de erosión para la unidad TELILUT (38 y 149 T/ha/año). Las tasas de erosión más bajas fueron: por la estimación directa MELILUT (22 T/ha/año) y por la estimación indirecta SULILUT (23 y 92 T/ha/año) y SULULUT (23 y 92 T/ha/año).

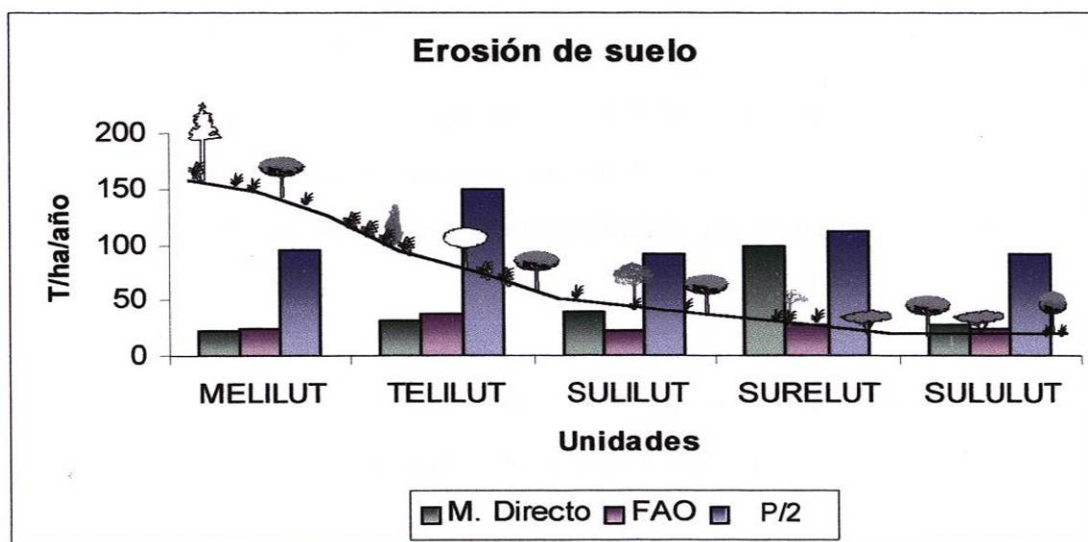


Figura 4.5.- Tasas de erosión de suelo estimadas para cada Unidad Geomorfológica, en comparación con las tasas reales de erosión para el año de 1999.

Al comparar los valores estimados por el método indirecto, variante índice P/2, con los valores obtenidos por el método directo, podemos decir que el método indirecto sobrestimó los valores reales de erosión para todas las unidades geomorfológicas de la microcuenca (Figura 4.5). Lo anterior concuerda con lo reportado por Figueroa (1975) (citado por Almaguer *et al.*, 1990) quien al estimar la pérdida de suelo para una cuenca, utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), obtuvo valores mayores a la pérdida de suelo real para dicha cuenca.

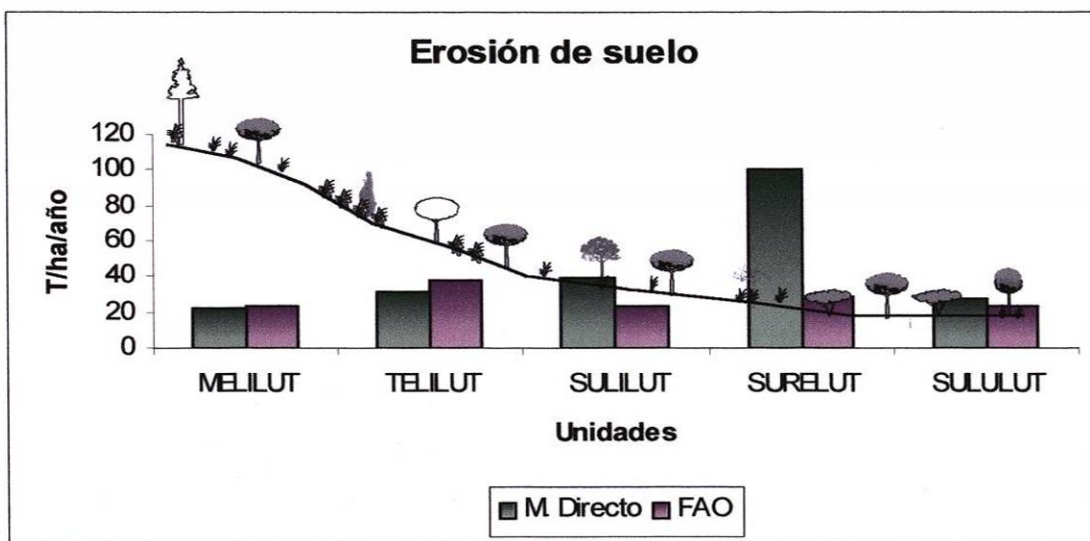


Figura 4.6.- Comparación de tasas de erosión reportadas por el método directo y estimadas por el método indirecto, variante índice de Fournier. Se incluye un perfil esquematizado mostrando la ubicación de las unidades geomorfológicas con respecto a la pendiente de la microcuenca.

En las gráficas de las Figuras 4.5 y 4.6 se puede observar la tendencia que presenta el método indirecto, variante FAO, con respecto a la erosión real, el cual, en pendientes altas, tiende a sobrestimar los valores reales y en pendientes bajas, la tendencia es a subestimar la tasa real de erosión; esto pudiera deberse a que el método indirecto utilizado da más peso al factor LS que a la presión ejercida sobre el suelo al

realizar un uso desmedido de éste, lo anterior coincide con los resultados obtenidos por Reyes *et al.* (1990) quienes al aplicar la USLE, reportan que el factor LS fue el que más influyó en la estimación de la pérdida de suelo.

Las diferencias más notorias entre las tasas de erosión estimadas por el método de FAO y las obtenidas por el método directo se dan en las unidades geomorfológicas SURELUT y SULILUT, en las cuales la erosión estimada por el método indirecto, subestima en mayor medida las tasas reales de erosión; esto se debe a que dichas unidades geomorfológicas cuentan con áreas desprovistas de vegetación en las cuales se han desarrollado cárcavas de tamaño considerable, por tal motivo el arrastre de suelo sucede a una mayor velocidad; la subestimación ocurre por que la presencia de cárcavas es un factor que no se considera en los métodos indirectos desarrollados a la fecha.

A una conclusión similar llegaron Coronato y del Valle (1993), quienes al aplicar un método indirecto (USLE) en su área de estudio, estimaron valores de erosión de 3.1 T/ha/año, los cuales estuvieron muy por debajo de los valores reales de 7.1 a 8 T/ha/año, estimados mediante dos métodos directos. Estos autores, al igual que Osborn *et al.* (1976), concluyen que la diferencia entre las estimaciones hechas por ambos métodos (directo e indirecto) es causada por la presencia de cárcavas en el área de estudio, y consideran que la densidad de cárcavas es un factor muy importante que debe ser incluido en la USLE.

Las dos unidades geomorfológicas que presentaron las mayores tasas de erosión mediante el método directo, se localizan en pendientes suaves lo que indica que no necesariamente a mayor pendiente mayor erosión de suelo, sin embargo estas áreas se encuentran cerca del núcleo poblacional por lo que reciben una mayor presión por parte de las actividades humanas. La presencia de cárcavas en estas áreas coincide con lo

reportado por Palacio y Vázquez (1990), al obtener en su estudio que alrededor del 67% de las cárcavas se encuentran en pendientes entre 2 y 8%, los autores encontraron también que el 90% de las cárcavas están asociadas a actividades humanas como agricultura (de riego y de temporal) y pastoreo.

Las tasas de erosión totales para la microcuenca, estimadas por las dos variantes del método indirecto, se comparan con las tasas reales de erosión en la gráfica de la Figura 4.7.

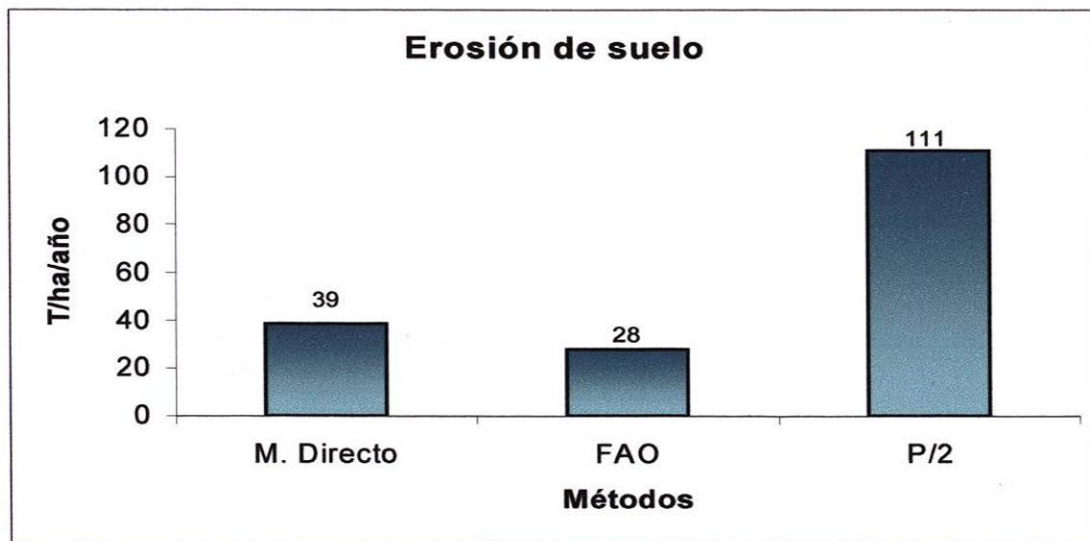


Figura 4.7.- Tasas totales de erosión, reales y estimadas, para la microcuenca de la presa “La Estrella”.

En la Figura 4.7 es notoria la sobrestimación de la tasa real de erosión para el área de estudio al aplicar el método indirecto variante índice P/2; dicha tasa (111 T/ha/año) es aproximadamente tres veces la tasa de erosión obtenida por el método directo (39 T/ha/año). Por otro lado, aún cuando el método de FAO arrojó valores cercanos a los obtenidos por el método directo en la mayoría de las unidades

geomorfológicas (Figuras 4.5 y 4.6), al comparar la tasa de erosión total para la microcuenca mediante este método (28 T/ha/año) y el método directo (39 T/ha/año), se observa una subestimación de los valores reales.

Por la tasa de erosión obtenida al aplicar el método indirecto propuesto por FAO (28 T/ha/año) o la obtenida al por métodos directos (39 T/ha/año), la erosión en la microcuenca quedaría catalogada como moderada, de acuerdo a la clasificación de la propia FAO (1979), mientras que la erosión obtenida al aplicar el índice P/2 se clasificaría como alta.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al comparar los resultados obtenidos por ambos métodos, se concluye que: el método indirecto, variante índice de Fournier, se aproximó más a los valores reales obtenidos por el método directo, que cuando se utilizó la variante P/2. El método indirecto, variante índice P/2, sobrestimó los valores reales de erosión de suelo para el año de 1999, en todas las unidades geomorfológicas.

El método indirecto variante índice de Fournier (propuesto por FAO, 1979), tendió a sobrestimar los valores de erosión en las unidades geomorfológicas con pendientes medias y tendidas, contrario a la tendencia que presentó para las UG con pendientes suaves en las cuales subestimó los valores reales de erosión hídrica.

Aún y cuando el método indirecto, variante índice de Fournier, se aproximó a los valores reales de erosión de suelo en la mayoría de las unidades geomorfológicas de la microcuenca, al comparar los valores de erosión para toda la microcuenca en su conjunto, subestimó los valores reales.

La hipótesis planteada para la presente investigación, donde se afirma que el método indirecto para la estimación de la pérdida de suelo, tiende a sobreestimar los valores reales de erosión, se cumple si se compara con los resultados obtenidos mediante el método indirecto variante P/2, tanto en la pérdida total de suelo como en la estimada para cada una de las unidades geomorfológicas de la microcuenca. Por otro lado si la hipótesis es comparada con los resultados obtenidos mediante el método indirecto variante FAO, se cumple sólo para las unidades que se encuentran en pendientes medias y tendidas, pero no para la estimación de la pérdida total de suelo en la microcuenca.

Es recomendable probar los métodos directo e indirecto en otras áreas para tratar de determinar algún factor que permita aproximar las estimaciones indirectas a la realidad en las áreas donde la disparidad entre las estimaciones de ambos métodos sea más acentuada.

La marcada disparidad en los valores de erosión estimados mediante el método indirecto propuesto por FAO, comparados con los valores reales para las UG SURELUT y SULILUT, se debe a la presencia de cárcavas en dichas unidades.

El método propuesto por FAO parece ser bastante preciso, siempre y cuando no existan cárcavas en el área que se evalúa. Al respecto, se sugiere realizar más investigaciones en áreas que presenten cárcavas, para determinar la inclusión de un factor relacionado con la presencia de éstas, o bien un factor de ponderación de la variable "K".

Para el área de estudio es necesario realizar trabajos encaminados al aspecto social para complementar las investigaciones que ahí se han realizado y conocer la percepción que los habitantes del lugar tienen con respecto al problema de la erosión hídrica en la zona; y así en conjunto, poder trabajar para buscar soluciones.

LITERATURA CITADA

- Almaguer, S., D. Plácido, E. Cardona, M. Hinojosa & B. Figueroa. (1990). Evaluación del riesgo de erosión en Tamaulipas. Memorias del 1er. Simposio Regional Avances y Perspectivas de la Investigación de Recursos Abióticos del Noreste de México. UAT. Cd. Victoria, Tamps. México. 77–97.
- Cavazos, P. & V. Molina. (1992). Registros climatológicos de la Región Citrícola de Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales. UANL. Boletín técnico No. 1. Linares, N. L., México.
- Castillo, D. (2000). Evaluación del germoplasma en el suelo de un ecosistema con alto grado de desertificación en el noreste de México. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Forestales, UANL. Linares, N. L.
- Colegio de Postgraduados. (1991). Manual de conservación del suelo y del agua. Tercera edición. Chapingo, México.
- CONAZA. (1994). Plan de acción para combatir la desertificación en México. Primera edición. Saltillo, Coah., México.
- Coronato, F. & del Valle, H. (1993). Methodological comparison in the estimate of fluvial erosion in arid closed basin of northeastern Patagonia. *Journal of Arid Environments*. Vol. 24:231-239.

- Curiel, B. (1990). Investigación sobre degradación de suelos en el estado de Jalisco. En: Memorias del Primer Simposio Nacional de Degradación del Suelo. Instituto de Geología UNAM Departamento de Edafología. México D. F. 7-12.
- Fanning, P. (1994). Long-term contemporary erosion rates in an arid rangelands environment in western New South Wales, Australia. *Journal of Arid Environments*. Vol. 28:173-187.
- FAO-PNUMA. (1980). Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma, Italia.
- FAO. (1979). A provisional methodology for soil degradation assessment. Roma, Italia.
- FAO. (1988). Sistema de clasificación de suelos. Roma, Italia.
- FitzPatrick, E. (1984). Suelos; su formación, clasificación y distribución. Primera edición. Editorial CECSA. México, D. F.
- Fournier, F. (1975). Conservación de suelos. Editorial Mundi – Rrensa. Madrid, España.
- García, E. (1988). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. Instituto de Geografía, UNAM. México, D. F.
- Garza, J. (1993). Mapeo geológico en el área Purísima de Conchos, Linares, N. L. y análisis de los ríos Pablillo, Potosí, Anegado y conchos en la misma área. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL. Linares, N.L.

- González, K., S. Hernández & D. Hernández. (1990). Evaluación de la pérdida de suelo (1ª. Aproximación) en una región de la Serranía de Actopan, Hidalgo, México. En: Memorias del Primer Simposio Nacional de Degradación del Suelo. Instituto de Geología UNAM Departamento de Edafología. México D. F. 71-72.
- Guerrero, J., F. Alberto, J. Hodgson, L. García-Ruiz & G. Monserrat-Martí. (1999). Plant Community Patterns in a Gypsum area of NE Spain. I. Interactions with topographic factors and soil erosion. *Journal of Arid Environments*. Vol. 41:401-410.
- Gutiérrez, R., N. Camacho & M. Naranjo. (1983). *Glosario de recursos naturales, agua suelo y vegetación*. Primera edición. Editorial LIMUSA. México, D. F.
- Hernández, S. (1997). Determinación de los procesos climo-pedo-geomorfológicos y agentes causantes de la desertificación en el ejido "Loma Alta". Inédito.
- INEGI. (1977). Carta edafológica Hualahuises G14C57. Escala 1:50,000. Primera edición. México, D. F.
- INEGI. (1986). Síntesis geográfica del estado de Nuevo León. México, D. F.
- INEGI. (1994). Linares Estado de Nuevo León, cuaderno estadístico municipal. Aguascalientes, Ags.
- INEGI. (2000). Carta topográfica Hualahuises G14C57. Escala 1:50,000. Segunda edición. Aguascalientes, Ags. México.

- Kenneth, N., P. Ffolliott, H. Gregersen & J. Thames. (1993). Hydrology and the Management of watershed. U.S.A.
- Kirkby, M. & R. Morgan. (1984). Erosion de suelos. Primera edición. Editorial LIMUSA. México D. F.
- Laflen, J., L. Lane & G. Foster. (1991). WEPP: A new generation of erosion prediction technology. *Journal Soil and Water Conservation*. Vol. 46:30-34.
- López-Blanco & J. Palacio. (1995). Cuantificación del crecimiento de las áreas erosionadas en cabeceras de cárcavas procesando imágenes de vídeo. *Investigaciones geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, núm. 3. México, D. F. 77-100.
- Maass, M. & O. García. (1990). La investigación sobre conservación de suelos en el centro de ecología de la UNAM. En: *Memorias del Primer Simposio Nacional de Degradación del Suelo*. Instituto de Geología UNAM Departamento de Edafología. México D. F. 3-4.
- Maldonado, A. (2001). Evaluación del proceso de erosión hídrica, en la microcuenca de captación de la presa "La Estrella", en el municipio de Linares, N. L. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Forestales, UANL. Linares, N. L.
- Mati, B., R. Morgan, F. Gichuki, J. Quinton, T. Brewer & H. Lingger. (2000). Assessment of erosion hazard with the USLE and GIS: a case study of the Upper Ewaso Ng'iro North basin of Kenya. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Vol. 2:78-86.

- Millar, E., M. Turk & D. Foth. (1975). *Fundamentos de la ciencia del suelo*. Primera edición en español. Editorial CECSA. México, D. F.
- Oropeza, R. & D. Flores. (1990). *Dinámica de la hidroerosión en una cuenca del estado de Guerrero, México*. En: *Memorias del Primer Simposio Nacional de Degradación del Suelo*. Instituto de Geología UNAM Departamento de Edafología. México D. F. 73-74.
- Osborn, H., J. Simanton & K. Renard. (1976). *Use of the USLE in the semiarid Southwest*. In *Soil Erosion: prediction and control*. Soil Conservation Society of America. Ankeny, Iowa, U.S.A. 21:41:49.
- Palacio, J. L. (1990). *Determinación de áreas de erosión potencial en cárcavas: un ejemplo en el centro de México*. *Investigaciones geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, núm. 21*. México, D. F. Pp. 45-55.
- Palacio, J. L. & L. Vázquez. (1990). *Definición de áreas de riesgo de erosión en cárcavas utilizando un sistema de información geográfica*. En: *Memorias del Primer Simposio Nacional de Degradación del Suelo*. Instituto de Geología UNAM Departamento de Edafología. México D. F. 75-76.
- Pierson, F. (2000). *Erosion models: use and misuse on rangelands*. En: *Rangelands desertification*, editado en 2000 por O. Arnalds y S. Archer. Editorial Kluwer Academic Publishers. Norwell, MA. U.S.A. 67-76.

- Rey, C. (1996). Manual para el diagnóstico y monitoreo de la erosión. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de suelos. Área de Manejo y Conservación del Suelo y Agua. México D. F.
- Reyes, J., H. Volke, S. Figueroa, Ch. Estrella & H. Vaquera. (1990). Caracterización de la erosión hídrica laminar y en arroyuelos caso: Paraje Zaayucuanino de Wochixtlan, Oaxaca. En: Memorias del Primer Simposio Nacional de Degradación del Suelo. Instituto de Geología UNAM Departamento de Edafología. México D. F. 79-80.
- Siebe, C., R. Jahn & K. Stahr. (1996). Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Publicación especial 4. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. Chapingo, México.
- Troeh, F., J. Hobbs & R. Donahue. (1980). Soil and water conservation for productivity and environmental protection. Editorial Prentice – Hall. Estados Unidos.
- Velasco, M. (1991). Las zonas áridas y semiáridas, sus características y manejo. Primera edición. Editorial LIMUSA. México, D. F.
- Villalón, M., P. Carrillo & M. Soto. (1991). Comparación de dos longitudes de líneas de muestreo para estimar cobertura en el matorral tamaulipeco mediante el método de puntos modificado. Facultad de Ciencias Forestales. UANL. Reporte Científico No. 23. Linares, N. L., México.
- Woerner, M. (1989). Métodos químicos para el análisis de suelos calizos de zonas áridas y semiáridas. Facultad de Ciencias Forestales. UANL. Linares, N. L., México.

Woerner, M. (1990). Los suelos del bosque escuela de la UANL en la Sierra Madre Oriental, Iturbide, N. L. Facultad de Ciencias Forestales. UANL. Reporte científico. No. 20. Linares, N. L., México.

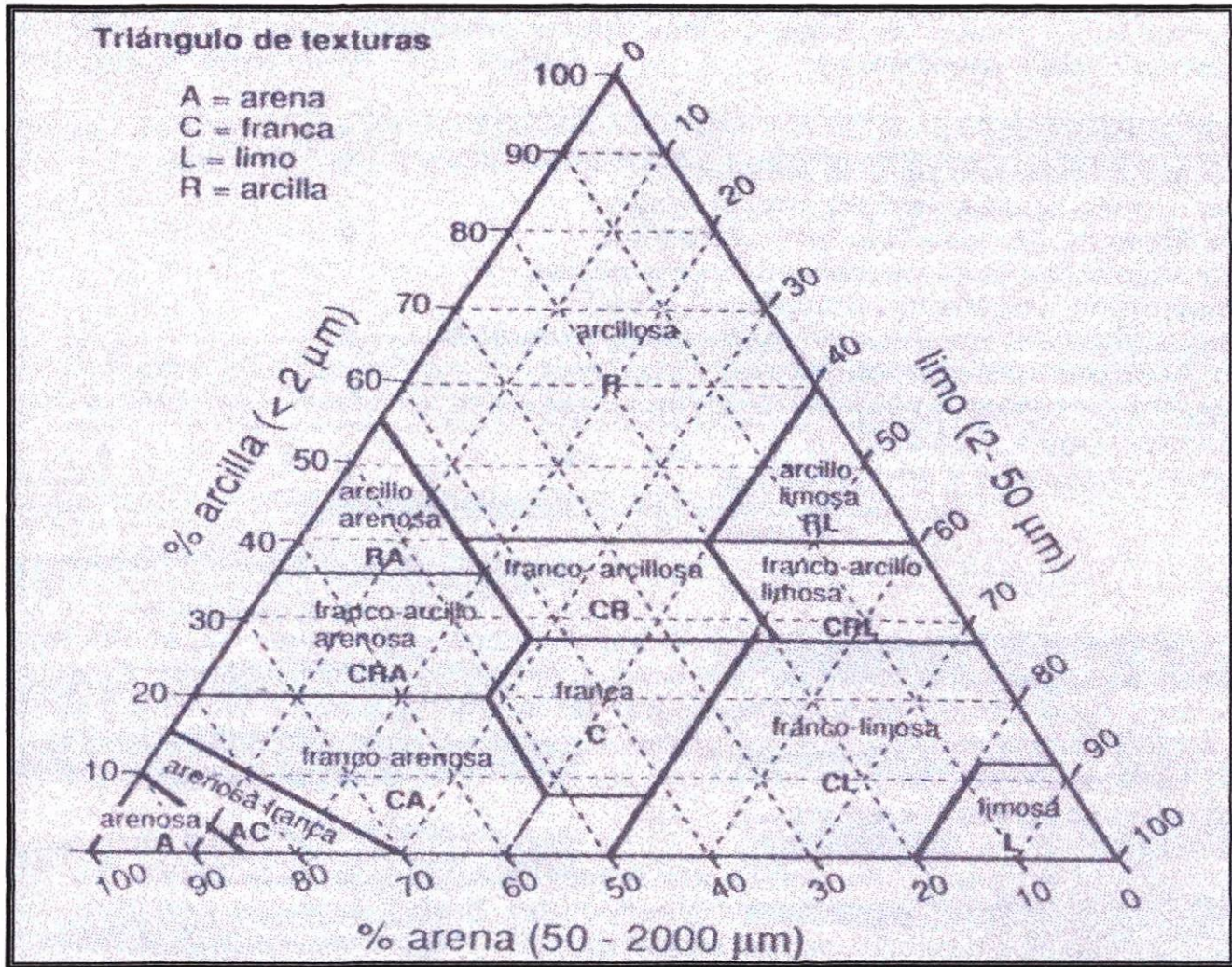
Young, A. (1989). Trends in soil-conservation research and policy. En: Agroforestry for soil conservation. C A B International. Reino Unido.

ANEXOS

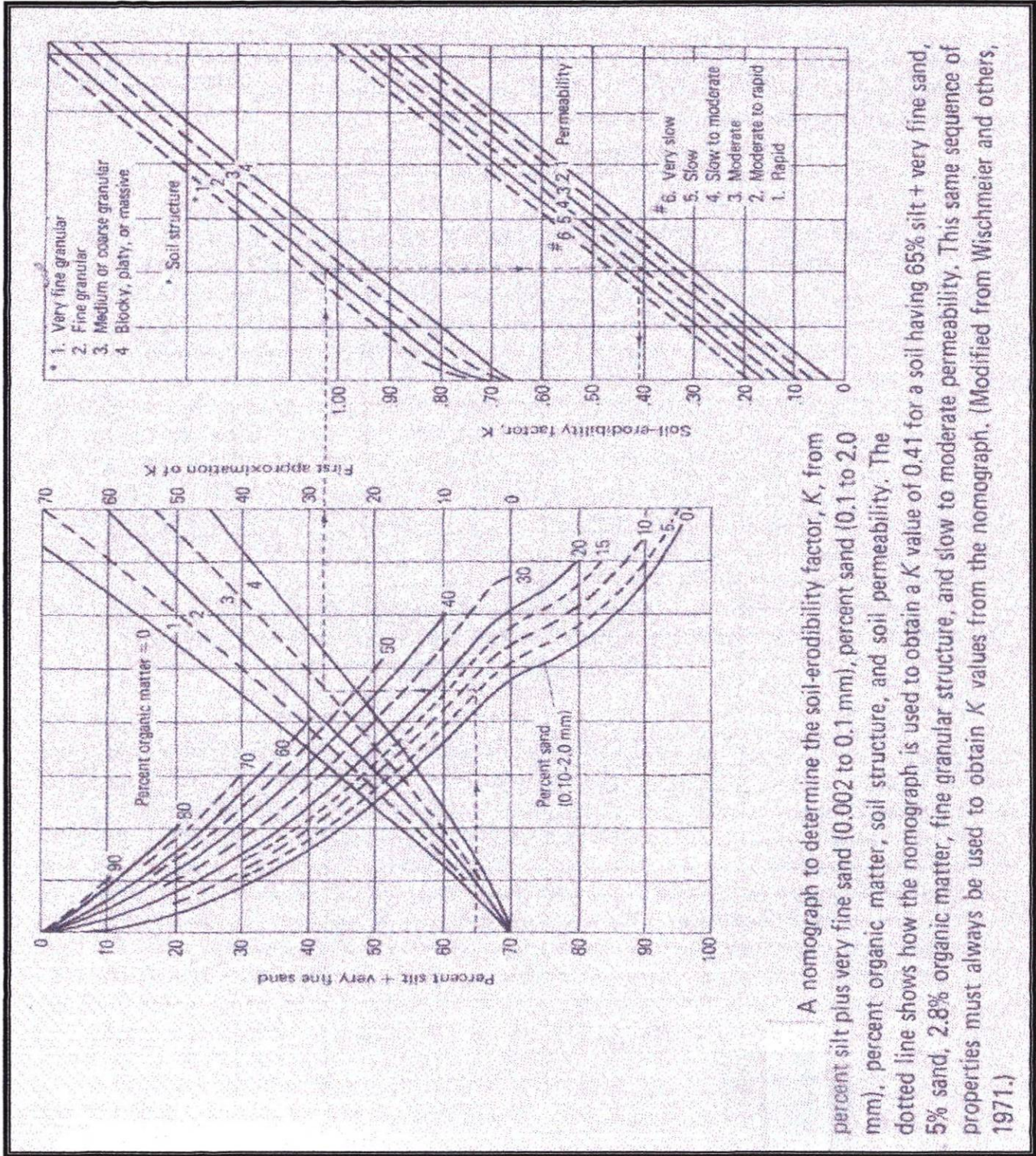
Anexo 1.- Claves para la determinación de textura al tacto (Schlichting & Blume, 1966, modificado; tomado de Siebe *et al.*, 1996).

No. corr.	Características	Seguir en No.	Tipo de textura	Clave
1	Intentar formar con la muestra un rollito del grosor de un lápiz: a) moldeable; b) no moldeable.	4 2		
2	Palpar la consistencia entre los dedos índice y pulgar a) adhesiva, se adhiere al dedo; b) no adhesiva, no moldeable.	3	Franco arenosa	CA
3	Frotar la muestra entre las palmas de las manos: a) consistencia muy harinosa, no se perciben granos de arena; b) consistencia muy harinosa y se perciben granos de arena (<50% arena); c) muy arenosa (50-85% arena), queda material fino en las líneas de la palma; d) muy arenosa (>85% arena), no queda material fino en las líneas de la palma.		Limosa Franco limosa gruesa Arenosa franca Arenosa	L CLg AC A
4	Intentar moldear un rollo del grosor de una aguja gruesa para tejer: a) moldeable, superficie opaca, consistencia harinosa; b) moldeable, consistencia plástica, pegajosa; c) no moldeable, se adhiere al dedo, se perciben granos de arena (>46% de arena).	5 6	Franco arcillo arenosa	CRA
5	Evaluar la consistencia: a) adhesiva, harinosa, se agrieta fácilmente al presionar; b) ligeramente harinosa, casi no se agrieta, muy moldeable; c) granos de arena visibles y perceptibles, se agrieta al presionar.		Franco limosa fina Franco-arcillo-limosa Franca	CLI CRL C
6	Evaluar la superficie de la muestra después de friccionarla con la uña del dedo: a) superficie opaca o con brillo tenue, casi no se perciben granos de arena; b) superficie opaca a ligeramente brillante, granos de arena perceptibles; c) superficie brillante.		Franco arcillosa Arcillo arenosa	CR RA
7	Evaluar la consistencia entre los dientes: a) rechina; b) consistencia de mantequilla.	7	Arcillo limosa Arcillosa	RL R

Anexo 2.- Triángulo de texturas (tomado de Siebe *et al.*, 1996).



Anexo 3.- Nomograma para la determinación del factor de erodabilidad del suelo "K" (tomado de Troeh *et al.*, 1980).



A nomograph to determine the soil-erodibility factor, K , from percent silt plus very fine sand (0.002 to 0.1 mm), percent sand (0.1 to 2.0 mm), percent organic matter, soil structure, and soil permeability. The dotted line shows how the nomograph is used to obtain a K value of 0.41 for a soil having 65% silt + very fine sand, 5% sand, 2.8% organic matter, fine granular structure, and slow to moderate permeability. This same sequence of properties must always be used to obtain K values from the nomograph. (Modified from Wischmeier and others, 1971.)

Anexo 5.- Cuadro de valores para el factor de cobertura "C" (U.S. Soil Conservation Service; tomado de Kenneth *et al.*, 1993).

Tipo de Vegetación	Altura Efectiva (m)	% de cobertura (b)	Residuo o vegetación en la superficie del suelo Porcentaje de cobertura de la superficie (a) (c)	Residuo o vegetación en la superficie del suelo					
				0	20	40	60	80	95-100
Sin vegetación			P	.45	.20	.10	.042	.012	.003
			H	.45	.24	.15	.091	.043	.011
Herbáceas grande o arbustos chicos	0.5	25	P	.36	.17	.09	.038	.013	.003
			H	.36	.20	.13	.083	.041	.011
		50	P	.26	.13	.07	.035	.012	.003
			H	.26	.16	.11	.076	.039	.011
		75	P	.17	.10	.06	.032	.011	.003
			H	.17	.12	.09	.067	.038	.011
Arbustos o matorrales	2.0	25	P	.40	.18	.09	.040	.013	.003
			H	.40	.22	.11	.087	.042	.011
		50	P	.34	.16	.085	.038	.012	.003
			H	.34	.19	.13	.082	.011	.011
		75	P	.28	.14	.08	.036	.012	.003
			H	.28	.17	.12	.078	.040	.011
Arboles	4.0	25	P	.42	.19	.10	.041	.013	.003
			H	.42	.23	.14	.089	.042	.011
		50	P	.39	.18	.09	.040	.013	.003
			H	.39	.21	.14	.087	.042	.011
		75	P	.36	.17	.09	.039	.013	.003
			H	.36	.20	.13	.084	.041	.011

a. Todos los valores asumen una distribución al azar de los residuos y la vegetación
b. Porcentaje total de superficie que sería oculta por el follaje aéreo.
c. (P) Cobertura superficial de pastos, C (H) Cobertura superficial de herbáceas o residuos no incorporados.

Anexo 6.- Unidades Ambientales agrupadas por Unidad Geomorfológica.

MELILUT					
CLAVE	AREA (ha)	FAO T/Ha/Año	FAO Toneladas	P/2 T/Ha/Año	P/2 Toneladas
Lipien10	27.98	17.34	485.13	68.51	1916.57
Lipien14	31.73	25.08	795.96	99.09	3144.57
Lipien22	66.59	41.94	2792.34	165.68	11031.58
Lipien19	30.87	35.39	1092.50	139.81	4316.12
Lien22	23.46	20.97	491.96	82.84	1943.57
Lien19	95.84	17.69	1695.76	69.91	6699.36
Lien19	118.22	17.69	2091.91	69.91	8264.42
TELILUT					
CLAVE	AREA (ha)	FAO T/Ha/Año	FAO Toneladas	P/2 T/Ha/Año	P/2 Toneladas
Lien11	29.12	9.61	279.89	37.97	1105.74
Lien11	74.60	9.61	716.92	37.97	2832.29
Lien11	82.27	9.61	790.63	37.97	3123.50
Litran4	56.26	5.40	303.63	21.32	1199.53
Litran11	31.50	38.44	1210.80	151.87	4783.45
Lides11	3.72	565.31	2103.29	2233.36	8309.40
Litran11	35.46	38.44	1363.06	151.87	5384.99
Lides4	5.11	79.37	405.27	313.54	1601.10
Lides4	0.73	79.37	57.77	313.54	228.22
Lides4	4.94	79.37	391.95	313.54	1548.44
Limat4	2.81	7.02	19.71	27.75	77.87
Limat4	33.23	7.02	233.39	27.75	922.03
Liagri4	1.02	51.59	52.72	203.80	208.27
Litran11	92.29	38.44	3547.74	151.87	14015.93
Limat11	40.88	50.03	2045.14	197.65	8079.64
Limat11	35.67	50.03	1784.36	197.65	7049.39
Liagri11	14.17	367.45	5208.52	1451.69	20577.10
TELULUT					
CLAVE	AREA (ha)	FAO T/Ha/Año	FAO Toneladas	P/2 T/Ha/Año	P/2 Toneladas
Luagri11	3.15	336.31	1058.39	1328.66	4181.35
Lumat11	4.00	45.79	183.23	180.90	723.89
Luagri11	11.96	336.31	4023.74	1328.66	15896.44
SULILUT					
CLAVE	AREA (ha)	FAO T/Ha/Año	FAO Toneladas	P/2 T/Ha/Año	P/2 Toneladas
Litran2	3.50	3.45	12.09	13.63	47.75
Litran2	6.45	3.45	22.25	13.63	87.89

Anexo 6.- Unidades Ambientales agrupadas por Unidad Geomorfológica (continuación).

Litran2	19.05	3.45	65.72	13.63	259.63
Liagri2	2.09	32.98	68.97	130.30	272.49
Limat2	6.18	4.49	27.75	17.74	109.63
Lides2	74.20	50.74	3765.14	200.46	14874.81
Limat2	5.87	4.49	26.34	17.74	104.06
Liagri2	9.98	32.98	329.00	130.30	1299.78
Limat2	21.78	4.49	97.82	17.74	386.44
Liagri2	7.98	32.98	263.34	130.30	1040.38
Limat2	41.39	4.49	185.86	17.74	734.25
Liagri2	1.96	32.98	64.80	130.30	256.02
Limat2	2.87	4.49	12.88	17.74	50.90
Litran2	1.43	3.45	4.95	13.63	19.54
Litran2	5.56	3.45	19.18	13.63	75.77
Litran2	3.95	3.45	13.62	13.63	53.82
SURELUT					
CLAVE	AREA (ha)	FAO T/Ha/Año	FAO Toneladas	P/2 T/Ha/Año	P/2 Toneladas
Redes2	96.02	49.88	4789.64	197.07	18922.26
Remat2	1.82	4.41	8.04	17.44	31.78
Remat2	4.40	4.41	19.41	17.44	76.68
Remat4	0.67	6.90	4.63	27.28	18.30
Remat4	2.02	6.90	13.98	27.28	55.21
Remat4	2.92	6.90	20.17	27.28	79.68
Remat4	9.91	6.90	68.42	27.28	270.30
Remat2	21.08	4.41	93.08	17.44	367.72
Redes4	5.76	78.02	449.72	308.23	1776.68
Remat2	10.17	4.41	44.91	17.44	177.43
Reagri2	45.47	32.42	1474.29	128.09	5824.44
Remat2	2.54	4.41	11.21	17.44	44.27
Remat2	2.25	4.41	9.92	17.44	39.20
Reagri2	0.74	32.42	23.86	128.09	94.27
Remat2	30.98	4.41	136.74	17.44	540.23
Reagri2	3.72	32.42	120.74	128.09	477.01
Reagri2	0.72	32.42	23.28	128.09	91.97
Reagri2	13.37	32.42	433.59	128.09	1712.96
Reagri2	5.25	32.42	170.24	128.09	672.58
Reagri2	7.53	32.42	244.23	128.09	964.88
Remat2	11.21	4.41	49.49	17.44	195.53
Remat2	13.03	4.41	57.51	17.44	227.22

Anexo 6.- Unidades Ambientales agrupadas por Unidad Geomorfológica (continuación).

SULULUT					
CLAVE	AREA (ha)	FAO T/Ha/Año	FAO Toneladas	P/2 T/Ha/Año	P/2 Toneladas
Lumat2	1.92	4.11	7.90	16.24	31.22
Luagri2	13.16	30.19	397.14	119.26	1568.95
Lumat2	10.78	4.11	44.32	16.24	175.09
Luagri2	3.27	30.19	98.77	119.26	390.21
Lumat2	4.14	4.11	17.02	16.24	67.25
Lumat2	2.72	4.11	11.19	16.24	44.22
Lumat2	1.21	4.11	4.96	16.24	19.59
Lumat2	0.67	4.11	2.76	16.24	10.89
Luagri2	1.93	30.19	58.27	119.26	230.21
Lumat2	11.68	4.11	47.99	16.24	189.61
Lumat2	4.79	4.11	19.69	16.24	77.79
Luagri2	1.66	30.19	50.12	119.26	198.02
Lumat2	4.54	4.11	18.67	16.24	73.77
Luagri2	0.61	30.19	18.45	119.26	72.87
Luagri2	0.39	30.19	11.69	119.26	46.19
Luagri2	0.44	30.19	13.30	119.26	52.56
Luagri2	0.52	30.19	15.83	119.26	62.53
Luagri2	405.21	30.19	12232.21	119.26	48325.31
Lumat2	83.08	4.11	341.47	16.24	1349.02
Lumat2	2.75	4.11	11.31	16.24	44.68
Lumat2	18.12	4.11	74.47	16.24	294.20
Lumat2	0.67	4.11	2.74	16.24	10.83
Lumat2	7.47	4.11	30.68	16.24	121.22
Luagri2	11.02	30.19	332.53	119.26	1313.70
Lumat2	0.76	4.11	3.11	16.24	12.28
Luagri2	3.56	30.19	107.51	119.26	424.74
SUVELUT					
CLAVE	AREA (ha)	FAO T/Ha/Año	FAO Toneladas	P/2 T/Ha/Año	P/2 Toneladas
Veagri2	96.95	27.95	2709.82	110.42	10705.57
Vemat2	2.59	3.81	9.86	15.03	38.96
Veagri2	1.38	27.95	38.63	110.42	152.61
Vemat2	2.36	3.81	8.97	15.03	35.45
Vemat2	5.56	3.81	21.15	15.03	83.58

