



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

**"PROPUESTA DE RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL
EN LAS MICROCUENCAS RÍO MILPA ALTA Y RÍO CILCUAYO,
DELEGACIÓN MILPA ALTA, DISTRITO FEDERAL"**

T E S I S

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS FORESTALES

P R E S E N T A:



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES

YOLANDA FRANCO ISLAS

Chapingo, Estado de México, mayo del 2009

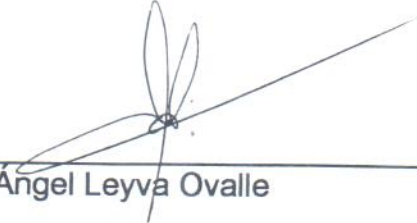


**PROPUESTA DE RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL EN LAS
MICROCUENCAS RÍO MILPA ALTA Y RÍO CILCUAYO, DELEGACIÓN
MILPA ALTA, DISTRITO FEDERAL**

Tesis realizada por **Yolanda Franco Islas**, bajo la dirección del Comité Asesor
indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener
el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR: 
Dr. Diódoro Granados Sánchez

ASESOR: 
M en C. Ángel Leyva Ovalle

ASESOR: 
Dr. José Luis Romo Lozano

DATOS BIOGRÁFICOS

La autora del presente trabajo, es originaria del Estado de Hidalgo. La instrucción Primaria la realicé en la Escuela "Dr. Antonio Peñafiel", Municipio de Atotonilco el Grande, Hgo., la Educación Secundaria en la Escuela Secundaria Federal "Jorge Viesca Palma", ubicada en el mismo municipio, la formación media superior en el Centro de Bachillerato Tecnológico industrial y de servicios No. 5, Zacualtipán de Ángeles, Hgo. La carrera profesional la realicé en la Universidad Autónoma Chapingo en la División de Ciencias Forestales, cursando la Ingeniería en Restauración Forestal.

En experiencia laboral como Personal de Apoyo y Asistencia a la Educación en el CBTis No. 5, de septiembre de 1985 a enero de 1995. Jefe del Depto de Planeación y Evaluación, CBTis No. 5, de febrero de 1995 a julio del 2001. Realización del Servicio Social en la Reserva de la Biosfera de Mapimí Dgo., con el proyecto "Desarrollo de ecotecnias para el aprovechamiento y uso eficiente del agua en la producción de Huizache, Mezquite y Palofierro del 13 de enero al 15 de diciembre de 2005.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a las siguientes instituciones y personas que han hecho posible la realización de este trabajo: Al pueblo de México, que por medio del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), me apoyaron económicamente para la realización de mis estudios de Maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo, a través de la División de Ciencias Forestales por los apoyos recibidos para realizar el programa de estudios.

Al Comité Asesor que dirigió la realización de esta investigación: Dr. Diódoro Granados Sánchez, M en C. Ángel Leyva Ovalle, Dr. José Luis Romo Lozano, por su tiempo y aportes para la realización de este trabajo.

A las autoridades comunales de la Delegación Milpa Alta y a los profesores: Dr. Gil A. Vera Castillo, M en C. Jaime Rey Contreras, Dr. Gustavo Arévalo Galarza, M en C. Juan Hernández Juárez y M en C. Ronaldo Ontiveros, por su apoyo en la realización de esta investigación.

Finalmente, a mis amigos y compañeros de Maestría: Erick, Rafa, Elsa, Yessika, Manuel, Noel y Héctor.

DEDICATORIA

A MI MADRE Y HERMANA

CON CARÍÑO Y AGRADECIMIENTO

**PROPUESTA DE RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL EN LAS
MICROCUENCAS RÍO MILPA ALTA Y RÍO CILCUAYO, DELEGACIÓN
MILPA ALTA, DISTRITO FEDERAL**

El jurado que revisó y aprobó el examen de grado de la **C. Yolanda Franco Islas**, autor de la presente tesis de Maestría en Ciencias Forestales estuvo constituido por:

DIRECTOR: 
Dr. Diódoro Granados Sánchez

ASESOR: 
M en C. Ángel Leyva Ovalle

ASESOR: 
Dr. José Luis Romo Lozano

ÍNDICE GENERAL

	Página
AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIA	v
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE CUADROS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE GRÁFICAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
RESUMEN	xvi
ABSTRACT	xvi
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	5
2.1 General	5
2.2 Específicos	5
3. REVISIÓN DE LITERATURA	6
3.1 Antecedentes del área de estudio	6
3.2 La Restauración hidrológico-forestal	7
3.3 Técnicas de restauración hidrológico-forestal	10
3.3.1 Biotecnias	11
3.3.2 Prácticas agronómicas	17
3.3.3 Prácticas mecánicas	19

3.3.4 Hidrotecnias	24
3.3.5 Captación de agua de lluvia	29
3.4 Zonificación para la restauración hidrológico-forestal	33
3.4.1 Áreas ribereñas	33
3.4.2 Vertientes	35
3.4.3 Áreas de bosque	36
3.4.4 Áreas de pastizal	37
3.4.5 Áreas para captación de agua de lluvia	38
3.5 La regeneración en la restauración hidrológico-forestal	38
3.6 Elección de especies para la restauración hidrológico-forestal	39
3.7 La cuenca hidrográfica	40
3.7.1 Variables hidrológicas	43
3.7.2 Sedimentos aportados	45
3.8 Los Sistemas de Información Geográfica en la Simulación de modelos de pérdida de suelos	46
4. MATERIALES Y MÉTODOS	49
4.1 Marco físico	49
4.2 MÉTODOS	56
4.2.1 Variables hidrológicas	56
4.2.1.1 Delimitación del área de estudio	56
4.2.1.2 Modelo de Elevación Digital	57
4.2.1.3 Simulación de la hidrología superficial	57

4.2.1.4 Datos vectoriales	57
4.2.2 Sistema de simulación para determinar variables hidrológicas	59
4.2.3 Sistema de simulación para cálculo de sedimentos aportados	64
4.2.4 Zonificación para la restauración hidrológico-forestal	67
5. RESULTADOS	69
5.1 Microcuenca Río Milpa Alta	69
5.1.1 Variables hidrológicas	69
5.1.2 Sedimentos aportados	73
5.1.3 Zonificación para la restauración hidrológico-forestal	76
5.2 Microcuenca Río Cilcuayo	81
5.2.1 Variables hidrológicas	81
5.2.2 Sedimentos aportados	85
5.2.3 Zonificación para la restauración hidrológico-forestal	87
5.3 Propuesta de restauración hidrológico-forestal en las Microcuencas Río Milpa Alta y Río Cilcuayo	92
6. DISCUSIÓN	109
7. CONCLUSIONES	123
8. RECOMENDACIONES	125
9. LITERATURA CITADA	126
10. ANEXOS	130

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
1 Requerimientos para construcción de fajas	15
2 Presas de control de azolves	28
3 Clasificación de cuencas hidrográficas	41
4 Potencial de escurrimiento de los suelos	44
5 Tipos de vegetación	130
6 Cobertura vegetal	130
7 Clasificación hidrológica de suelos	131
8 Curva numérica para estimar la escorrentía	132
9 Condición de humedad antecedente	133
10 Curva numérica corregida	133
11 Valores del factor K	134
12 Exponente asociado al porcentaje de pendiente	135
13 Factor C para bosques	135
14 Factor C para pastizales, matorral y arbustos	135
15 Factor C para cultivos	136
16 Factor P para prácticas mecánicas	136
17 Estaciones meteorológicas del área de influencia	137

ÍNDICE DE TABLAS

		Página
1	Características geomorfológicas, Microcuenca Río Milpa Alta	69
2	Características geomorfológicas, Microcuenca Río Cilcuayo	81
3	Variables hidrológicas, Microcuenca Río Milpa Alta	138
4	Variables hidrológicas por área, Microcuenca Río Milpa Alta	139
5	Clasificación de variables hidrológicas, Microcuenca Río Milpa Alta	139
6	Variables hidrológicas, Microcuenca Río Cilcuayo	140
7	Variables hidrológicas por área, Microcuenca Río Cilcuayo	141
8	Clasificación de variables hidrológicas, Microcuenca Río Cilcuayo	141

ÍNDICE DE GRÁFICAS

	Pág.
1 Escurrimiento máximo instantáneo por área. Microcuenca Río Milpa Alta	70
2 Escurrimiento máximo instantáneo (Moderadamente alto) por tipo de cobertura, Microcuenca Río Milpa Alta	70
3 Escurrimiento máximo instantáneo (Moderado) por tipo de cobertura, Microcuenca Río Milpa Alta	71
4 Escurrimiento máximo instantáneo (Ligero) por tipo de cobertura vegetal. Microcuenca Río Milpa Alta	71
5 Escurrimiento superficial medio por área. Microcuenca Río Milpa Alta	72
6 Escurrimiento superficial (Moderadamente alto) por tipo de cobertura vegetal. Microcuenca Río Milpa Alta	72
7 Escurrimiento superficial (Moderado) por tipo de cobertura vegetal. Microcuenca Río Milpa Alta	73
8 Aportación de sedimentos por área, Microcuenca Río Milpa Alta	74
9 Aportación de sedimentos (Muy alto), Microcuenca Río Milpa Alta	74
10 Aportación de sedimentos (Alto), Microcuenca Río Milpa Alta	74
11 Aportación de sedimentos (Media), Microcuenca Río Milpa Alta	75
12 Aportación de sedimentos (Ligera), Microcuenca Río Milpa Alta	75

13	Zonificación de áreas para la restauración hidrológico-forestal, Microcuenca Río Milpa Alta	76
14	Áreas prioritarias. Microcuenca Río Milpa Alta	77
15	Áreas para aplicación de biotecnias. Microcuenca Río Milpa Alta	77
16	Áreas para aplicación de prácticas mecánicas. Microcuenca Río Milpa Alta	78
17	Áreas para la aplicación de biotecnias y prácticas mecánicas. Microcuenca Río Milpa Alta	79
18	Áreas para la implementación de hidrotecnias. Microcuenca Río Milpa Alta	79
19	Áreas para aplicación de biotecnias, prácticas mecánicas e hidrotecnias. Microcuenca Río Milpa Alta	80
20	Zonificación de áreas para la captación de agua de lluvia. Microcuenca Río Milpa Alta.	81
21	Escurrimiento máximo instantáneo por área . Microcuenca Río Cilcuayo	82
22	Escurrimiento máximo instantáneo (Moderado) por tipo de cobertura. Microcuenca Río Cilcuayo	82
23	Escurrimiento máximo instantáneo (Ligero) por tipo de cobertura. Microcuenca Río Cilcuayo	83
24	Escurrimiento superficial medio por área. Microcuenca Río Cilcuayo	84
25	Escurrimiento superficial (Moderadamente alto) por tipo de cobertura vegetal. Microcuenca Río Cilcuayo	84

26	Escorrentamiento superficial (Moderado) por tipo de cobertura vegetal. Microcuenca Río Cilcuayo	84
27	Aportación de sedimentos por área. Microcuenca Río Cilcuayo	85
28	Aportación de sedimentos (Muy alta). Microcuenca Río Cilcuayo	85
29	Aportación de sedimentos (Alta), Microcuenca Río Cilcuayo	86
30	Aportación de sedimentos (Ligera). Microcuenca Río Cilcuayo	86
31	Zonificación de áreas para restauración hidrológico-forestal. Microcuenca Río Cilcuayo	87
32	Áreas prioritarias, Microcuenca Río Cilcuayo	88
33	Áreas para aplicación de biotecnias. Microcuenca Río Cilcuayo	88
34	Áreas para prácticas mecánicas. Microcuenca Río Milpa Alta	89
35	Áreas para la implementación de biotecnias y prácticas mecánicas. Microcuenca Río Cilcuayo	90
36	Áreas para aplicación de hidrotecnias. Microcuenca Río Cilcuayo	90
37	Zonificación de áreas para la captación de agua de lluvia, Microcuenca Río Cilcuayo	91

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
1 Terraza de tierra	20
2 Terraza de piedra	21
3 Terraza de muro vivo	21
4 Terraza de formación sucesiva	21
5 Terraza de absorción	21
6 Terraza de banco	22
7 Terraza individual	22
8 Zanja bordo	23
9 Zanja trinchera	23
10 Zanja derivadora de escorrentía	23
11 Cepa común	24
12 Presa de ramas	26
13 Presa de malla de alambre	26
14 Presa de morillos	27
15 Presa de geotextiles	27
16 Protección de taludes	27
17 Presa de piedra acomodada	27
18 Presa de gaviones	28
19 Presa de mampostería	28
20 Microcaptación negarim	30
21 Bordos al contorno	30
22 Bordos semicirculares	30
23 Bordos trapezoidales	31
24 Bordos de piedra al contorno	31
25 Bordos derivadores	32
26 Presas permeables	32
27 Mapa de localización, Delegación Milpa Alta, D. F.	49
28 Mapa de localización del área de estudio	50

**PROPUESTA DE RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL EN LAS
MICROCUENCAS RÍO MILPA ALTA Y RÍO CILCUAYO,
DELEGACIÓN MILPA ALTA, DISTRITO FEDERAL**

**PROPOSAL OF FOREST-HYDROLOGIC RESTORATION IN THE
WATERSHEDS RÍO MILPA ALTA AND RÍO CILCUAYO,
DELEGACIÓN MILPA ALTA, DISTRITO FEDERAL**

Yolanda Franco Islas¹

Diódoro Granados Sánchez²

Ángel Leyva Ovalle³

RESUMEN

La restauración hidrológico-forestal, comprende técnicas biológicas y mecánicas dirigidas hacia el restablecimiento de la cobertura vegetal en un ecosistema. El objetivo de esta investigación es proponer estrategias de restauración hidrológico-forestal con base a la determinación de variables hidrológicas y volumen de sedimentos aportados a una sección del cauce en las Microcuencas Río Milpa Alta y Río Cilcuayo, Delegación Milpa Alta, Distrito Federal. Se aplicó la metodología de Curvas Número y Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada en un sistema de simulación matemática en lenguaje Borland C++Builder 5.0 y la representación gráfica de variables y zonificación de áreas en ArcView GIS 3.2. Los resultados indican que el 47% de la superficie de la Microcuenca Río Milpa Alta presenta pérdida de suelos Alta - Muy Alta (>50 ton/ha/año) y la Microcuenca Río Cilcuayo 54%. Presentan cobertura vegetal escasa y ausencia de prácticas de conservación. Para su restauración, se proponen técnicas preventivas y correctivas como biotecnias, hidrotecnias, prácticas agronómicas y mecánicas en áreas prioritarias y homogéneas.

Palabras clave: Restauración hidrológico-forestal, Simulación matemática, biotecnias, hidrotecnias, prácticas mecánicas.

ABSTRACT

The forest hydrologic restoration, includes biological and mechanical techniques directed towards the reestablishment of the vegetal cover in an ecosystem. The objective of this investigation is to propose strategies of forest hydrologic restoration with basis on the determination of hydrologic variables and volume of sediments poured to a section of the river bed in the watersheds Río Milpa Alta and Río Cilcuayo, Delegación Milpa Alta, Distrito Federal. Number curve's Methodology and the Modified Soil Loss Universal Equation were applied in a system of mathematical simulation in Language Borland C++Builder 5.0, and the graphic representation of variables and zoning of areas in Arc View 3.2. The results indicate that 47% of the surface of the watershed Río Milpa Alta presents High-Highest soil loss (>50 tons/hectare/year) and the watershed Río Cilcuayo 54%. They present scarce plant cover and absence of practices of soil conservation. For their restoration we propose preventive and corrective techniques like bio-techniques, hydro-techniques, agronomic and mechanical practices all on priority and homogeneous areas.

Key words: Forest hydrologic restoration, mathematical simulation, bio-techniques, hydro-techniques, mechanical practices.

¹ Autor

² Director de Tesis

³ Asesor de Tesis

1. INTRODUCCIÓN

La restauración ecológica es el conjunto de medidas y actividades tendientes a restablecer las condiciones ecológicas de los recursos naturales en un área determinada (Caro, 1993). A través del proceso de restauración ecológica, se intenta recuperar las condiciones asociadas a los beneficios que genera el manejo integral de una cuenca tales como: Conservación de hábitats para la flora y fauna, el rescate de espacios para la recreación y primordialmente la protección del suelo, la cantidad y calidad de agua (Brañes, 1994).

La unidad física básica en la regulación del agua es la cuenca. Los patrones hídricos observados, al igual que la cantidad y calidad del agua que de ella derivan, dependen de su relieve y pendiente, así como del tamaño, ubicación geográfica, tipo de suelo y principalmente del estado del conjunto de ecosistemas que la forman y el manejo de ésta (SEMARNAT, 2003).

El objetivo de esta investigación, es proponer estrategias de restauración hidrológico-forestal con base a la determinación de variables hidrológicas y volumen de sedimentos aportados a una sección del cauce en las Microcuencas Río Milpa Alta y Río Cilcuayo, ubicadas en la Delegación Milpa Alta, Distrito Federal; a través de la simulación matemática de dichas variables.

Los escurrimientos superficiales se determinaron aplicando el Método de Curva Numérica y el volumen de sedimentos aportados a una sección del cauce se determinó por medio del modelo matemático de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (EUPSM). El modelo matemático de la (EUPSM) se simuló mediante un sistema de cálculo e interfaz gráfica en el Lenguaje de programación Borland C++Builder 5.0, la base de datos en Database desktop e instrucciones estándares en lenguaje SQL. La representación gráfica de las variables hidrológicas, sedimentos aportados a una sección del cauce y zonificación de áreas prioritarias y áreas homogéneas para la restauración hidrológico-forestal se realizaron en el Sistema de Información Geográfica ArcView GIS 3.2.

Los sedimentos aportados en la Microcuenca Río Milpa Alta indican que el 15% de la superficie presenta una pérdida de suelo Muy alta (> 200 ton/ha/año) y el 32% Alta (50-200 ton/ha/año), se presenta en áreas de cultivo y áreas fragmentadas de bosque de encino, bosque de pino y matorral, cuyo índice de cobertura vegetal es de regular a mala ($< 50\%$). En la Microcuenca Río Cilcuayo, el 25% de la superficie presenta una aportación de sedimentos Muy Alta y el 29% Alta, los principales aportes se presentan en áreas agrícolas, matorral, bosque de pino, bosque de encino y bosque mixto (Pino-Aile), estas áreas presentan un índice de cobertura vegetal de regular a mala.

A través del condicionamiento del índice bajo y moderado de Esguerrimiento máximo instantáneo (Qp , m³/seg) e índice bajo de sedimentos aportados a una sección del cauce (Y , ton/ha/año), se zonificaron las áreas prioritarias para la restauración hidrológico-forestal. En la Microcuenca Río Milpa Alta el 52% de la superficie corresponde al Bosque de pino y 33% al bosque mixto. En la Microcuenca Río Cilcuayo el Bosque de pino representa el 70%, pastizal 10% y bosque de oyamel 9%; siendo estas áreas las más significativas para la propuesta de prácticas vegetativas y agronómicas para la conservación y restauración de suelos.

Así mismo, con el condicionamiento del índice moderado y moderadamente alto de (Qp , m³/seg) e índice medio a muy alto de (Y , ton/ha/año), se zonificaron las áreas homogéneas para la restauración hidrológico-forestal. En la Microcuenca Río Milpa Alta los mayores porcentajes en superficie corresponden a la implementación de biotecnias, prácticas mecánicas e hidrotecnias con un 34% e hidrotecnias 32%. En la Microcuenca Río Cilcuayo, 55% corresponde a la implementación de biotecnias y prácticas mecánicas y 22% para biotecnias, prácticas mecánicas e hidrotecnias.

Para la zonificación de áreas para captación de agua de lluvia, se condicionaron los índices moderado y moderadamente alto del esguerrimiento superficial medio (Q , mm), índice mínimo de (Y , ton/ha/año) y suelos con textura media. En la Microcuenca Río Milpa Alta se delimitaron áreas de bosque mixto (Pino-Aile),

bosque de pino, bosque de encino, matorral y pastizal. En la Microcuenca Río Cilcuayo, se delimitaron áreas de Bosque de oyamel, bosque de pino, bosque de encino y pastizal.

Para la restauración y conservación de áreas prioritarias en las Microcuencas Río Milpa Alta y Río Cilcuayo, se propone la regeneración inducida por siembra o plantación de especies nativas, así como el desarrollo de prácticas mecánicas y agronómicas que permitirán mejorar las condiciones de estructura y fertilidad del suelo. En áreas que presentan pérdida de suelo de Moderada a Muy alta, se propone la implementación de biotecnias con especies nativas y leguminosas, así como también el desarrollo de prácticas mecánicas e hidrotecnias con el propósito de interceptar los escurrimientos superficiales, reducir la erosión hídrica, mejorar el proceso de infiltración favoreciendo la supervivencia y desarrollo de la vegetación, así como mejorar la condición del suelo y la calidad de agua.

2 OBJETIVOS

2.1 General:

Proponer estrategias de restauración hidrológico-forestal con base a la determinación de variables hidrológicas y volumen de sedimentos aportados a una sección del cauce en las Microcuencas Río Milpa Alta y Río Cilcuayo, Delegación Milpa Alta, Distrito Federal, a través de la simulación matemática de dichas variables.

2.2 Específicos:

- Estimar las variables hidrológicas y volumen de sedimentos aportados a una sección del cauce de las Microcuencas Río Milpa Alta y Río Cilcuayo, Delegación Milpa Alta, D. F., a través de la simulación matemática de éstas.
- Zonificar las áreas prioritarias y homogéneas para restauración hidrológico-forestal y áreas para la captación de agua de lluvia en las Microcuencas Río Milpa Alta y Río Cilcuayo, Delegación Milpa Alta, D. F.
- Proponer técnicas para la restauración hidrológico-forestal y captación de agua de lluvia en las Microcuencas Río Milpa Alta y Río Cilcuayo, Delegación Milpa Alta, D. F.

3 REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Antecedentes del área de Estudio

En 1995, el Gobierno del Distrito Federal, realizó el “Estudio de prefactibilidad para la recarga del acuífero en el Suelo de Conservación del Distrito Federal” ejecutado durante el período de febrero de 1999 a febrero del 2000, cuyo objetivo fue implantar un manejo racional de los recursos hídricos que incluyeran un aprovechamiento integral del agua de lluvia y la recarga de mantos acuíferos.

La Delegación Milpa Alta en conjunto con la CORENADER (Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural, Región 3), detectaron 67 sitios para llevar a cabo acciones prioritarias en cauces; las líneas de estos trabajos se centran en la construcción de obras de conservación de suelo y agua, delimitación de cauces y limpieza de los mismos. En lo referente a obras de conservación de suelo y agua en el 2004 se desazolvaron 39 barrancas, removiendo 15,335 m³ de suelo aproximadamente, lo que representa cerca del 35% de la problemática registrada sobre aportación de sedimentos a los cauces (SAGARPA, GDF, FIRCO y CORENADER. 2004).

Se desarrollaron Proyectos de Restauración Ecológica en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, dirigidos principalmente a la conservación del bosque

buscando el incremento de la masa forestal para el mejoramiento de los servicios ambientales. Los resultados logrados hasta el año 2000 son apropiados, sin embargo, sólo atienden una parte del ecosistema dejando fuera el Suelo de Conservación conformado por las zonas altas del bosque, llanos inter-montanos, vertientes y la zona baja lacustre donde se ubica la Delegación Milpa Alta (SAGARPA, GDF, FIRCO y CORENADER. 2004).

3.2 La Restauración hidrológico-forestal

La restauración ecológica consiste en restablecer las comunidades naturales de un área determinada de la forma más precisa y congruente posible (Díaz, 1995). Comprende una serie de acciones orientadas a recuperar la cobertura vegetal y devolver a los ecosistemas alterados las condiciones que existían previamente al disturbio (SEMARNAP, 1998).

La restauración hidrológico-forestal se concibe como un conjunto de acciones mecánicas y biológicas, distribuidas en la cuenca y sus cauces (TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio de Medio Ambiente, 1998). Se plantea considerando que se debe llegar a una vegetación estable y permanente en equilibrio con las condiciones del medio en cuanto a composición, formación y estructura (Simon, N. E., 1992).

Los proyectos de restauración hidrológico-forestal constituyen un instrumento de conservación y mejora del suelo, agua y cubierta vegetal. Entre las medidas que contribuyen al desarrollo de este objetivo destacan:

1. Restaurar las superficies desprovistas de vegetación mediante prácticas o técnicas biológicas, agronómicas, mecánicas e hidrológicas; especialmente indicadas en aquellos sitios en que la colonización o regeneración natural sea incompleta o se realice a muy largo plazo.
2. Conservación estricta de aquellas especies singulares de la cubierta vegetal presentes en el área a restaurar, tales como:
 - Hábitats de especies infrecuentes o amenazadas.
 - Especies y asociaciones endémicas de área reducida.
 - Especies y asociaciones relictuales.
 - Especies y asociaciones que se encuentran en el límite de su área de distribución.
 - Cualquier manifestación de la cubierta vegetal que albergue valores indirectos significativos (Científico, paisajístico, faunístico, recreativo, cultural o antropogénico).
3. Control del material vegetal empleado en las nuevas repoblaciones, reduciendo al máximo el uso de especies exóticas, dando prioridad a los

ecotipos propios del área a restaurar. Esta medida es importante en áreas que albergan especies forestales valiosas, donde la introducción de otras procedencias puede originar un empobrecimiento de las poblaciones locales a largo plazo.

4. Conservar en la medida de lo posible la vegetación preexistente, utilizando técnicas de preparación del terreno menos agresivas que permitan el establecimiento de la nueva cubierta vegetal.
5. Conservación de los hábitats que sustentan poblaciones faunísticas notables, reduciendo la transformación de la cubierta vegetal.
6. Inclusión de criterios faunísticos en el diseño de repoblaciones, especialmente la conservación de especies que proporcionen recursos tróficos durante épocas deficitarias.
7. Gestión de nuevas masas forestales incorporando criterios paisajísticos.
8. Limitación de los métodos de preparación del terreno con fuerte impacto visual a las áreas especialmente vulnerables o que presentan un paisaje destacable.
9. Incluir medidas tendientes a la conservación de los usos tradicionales de la comunidad.

10. Fomentar campañas informativas sobre los objetivos y beneficios de las acciones previstas para la restauración hidrológico-forestal de la cuenca y la utilización de recursos, principalmente mano de obra como mecanismo de activación económica (TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio de Medio Ambiente, 1998).

La implementación y factibilidad de los trabajos de restauración depende de factores tales como: Grado de compromiso establecido entre los actores involucrados, las características intrínsecas del ecosistema (resiliencia, resistencia, elasticidad, fragilidad, composición de especies, estructura y funcionalidad) y de los aspectos técnicos del programa de restauración como: Presupuesto, disponibilidad de especies y recursos (Márquez, 2003).

3.3 Técnicas de restauración hidrológico-forestal

El proceso de restauración y conservación de los recursos suelo y agua, consiste en un conjunto de principios y técnicas que están condicionadas por una serie de parámetros (climáticos, geomorfológicos, edafológicos, agrotécnicos e hidrológicos). Entre las más sencillas y económicas, figuran las medidas biológicas y agronómicas, también llamadas medidas preventivas, que protegen el suelo contra agentes erosivos o refuerzan su resistencia al arrastre.

Las medidas de defensa, son obras cuyo fin es detener la acción del agua o viento y evitar la pérdida de suelo: Prácticas mecánicas, hidrotecnias y obras para la captación de agua de lluvia. Desde el punto de vista hidrológico refuerzan los objetivos de las medidas preventivas, controlan la velocidad de los escurrimientos, favorecen la infiltración y reducen la carga de sedimentos (Anaya *et al.*, 1991; FAO-IITA, 1997; TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio de Medio Ambiente, 1998; Becerra, 2000).

3.3.1 Biotécnicas

Las biotecnias para la restauración hidrológico-forestal de cuencas, tienen como objetivo prioritario la protección y la restauración de la cubierta vegetal para el control de los escurrimientos superficiales y disminución de la erosión hídrica, aumento de la infiltración, recarga de acuíferos y mejora de la calidad del agua (TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio de Medio Ambiente, 1998).

Serrada (1993) citado por (TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio de Medio Ambiente, 1998), define como el conjunto de técnicas vegetativas que son necesarias para crear una cubierta forestal, formada por especies vegetales arbóreas, arbustivas y herbáceas que sean estables con el medio en un terreno cuya vegetación actual es fragmentada o disminuida en mayor o menor grado según el uso asignado.

Son prácticas vegetativas que consideran el desarrollo de plantas o cultivos, con la finalidad de mejorar la capacidad productiva de los terrenos y disminuir la erosión del suelo (Anaya *et al.*, 1991).

Entre las biotecnias utilizadas para la conservación y restauración de suelos se tiene:

- **Barreras vegetales:** Es el establecimiento de plantas vivas a través de la pendiente, en sentido transversal; con el objeto de interrumpir los procesos de escorrentía y arrastre de sedimentos. Es una medida conservacionista sencilla y relativamente económica que se recomienda en los siguientes casos:
 - En terrenos con pendiente, suelos sin estructura donde se hace imposible la construcción de terrazas.
 - En laderas con pastizales naturales o artificiales.
- **Terrazas de muro vivo:** Terraplenes que se forman gradualmente, a partir del movimiento de suelo en pendientes y es retenido por setos de diversas especies de árboles o arbustos que se establecen siguiendo las curvas de nivel (Anaya *et al.*, 1991; CONAFOR, 2007).

- **Setos o cercos vivos:** Barreras vegetales de especies de rápido crecimiento, tienen la función de disminuir la velocidad del escurrimiento, favorecer la infiltración y generar productos adicionales como alimento, leña o forraje (CONAFOR, 2007).
- **Sistemas agroforestales:** Sistema y tecnologías de uso de la tierra donde se establecen especies leñosas junto con cultivos agrícolas bajo cierto arreglo espacial o secuencia temporal, permitiendo una interacción ecológica y económica entre los diferentes componentes (Nair, P. K. R., 1985).
- **Rotación de cultivos** (Anaya *et al.*, 1991; Becerra, 2000): Consiste en el establecimiento de una sucesión de cultivos diferentes en ciclos continuos, sobre una superficie de terreno determinada, debe programarse sobre condiciones ecológicas y socioeconómicas.
 - El ciclo de rotación debe ser mayor cuando el riesgo de erosión es alto (5 ó 6 años).
 - Las especies utilizadas deben estar adaptadas a la región e incluir una mayor proporción de cultivos perennes y leguminosas.
- **Abonos verdes:** Consiste en establecer especies en rotación, sucesión y asociación con cultivos (FAO-IITA, 1997), principalmente leguminosas, con la finalidad de incorporarlo al suelo en la época más propicia (no

descompuesto), comúnmente al inicio de la floración (Anaya *et al.*, 1991; Becerra, 2000), para promover un considerable y continuo aporte de biomasa al suelo, elevar el contenido de materia orgánica (10-18 ton/ha/año) (Becerra, 2000), promover el reciclaje de nutrientes, disminuir la evaporación del suelo y lixiviación de nutrientes y la adición de nitrógeno a través de la fijación biológica de las leguminosas (FAO-IITA, 1997).

- **Cultivo en contorno:** Práctica más simple y de gran eficiencia en el control de la erosión, consiste en la siembra de cultivos en sentido de las curvas de nivel del terreno, perpendicularmente a su pendiente (Sobral Filho *et al.*, 1980 citado por FAO-IITA 1997), el cultivo deberá asociarse a otras prácticas conservacionistas como terraceo y labranza de conservación.
- **Cultivos en fajas:** Es la ordenación de cultivos en tiempo y espacio de manera que se sucedan alternativamente en terrenos descubiertos o con escasa vegetación, son cubiertas de vegetación densa y resistente a la erosión hídrica o eólica.
 - **Fajas a nivel o en contorno:** Se adaptan a la topografía del terreno, la anchura de las mismas no es uniforme. Se emplea en terrenos poco fértiles, en áreas de pastizales con problemas de erosión.

- **Fajas de tipo mixto:** Adaptable a terrenos muy degradados; son fajas intercaladas de anchura variable, pueden ser continuas o discontinuas y de mayor densidad (cultivos anuales, frutales, forrajeras).

Cuadro 1. Requerimientos para construcción de fajas

Pendiente (%)	Ancho (m)
2 - 5	30
6 - 9	25
10- 14	20
15 - 20	15

Fuente: Morgan (1986)

- **Cultivos de cobertura** (Anaya *et al.*, 1991; Becerra, 2000): Consiste en la formación y establecimiento de una cubierta vegetal con el propósito de reducir la velocidad de escorrentía y la pérdida de suelo (Paningbatan *et al.*, 1995 citado por FAO-IITA 1997), deben establecerse después de la cosecha de un cultivo base (Anaya *et al.*, 1991). Se incluyen cultivos entre árboles frutales como pastos, leguminosas y cereales de grano pequeño.
- **Cobertura con residuos vegetales:** Consiste en el cubrimiento de la superficie del terreno con residuos de cosecha, principalmente de cultivos que producen grandes cantidades de rastrojo como: Maíz, sorgo, trigo, frijol, soya, girasol y avena. Alternativa de conservación de suelos muy importante en áreas donde la limitante es la precipitación. (Becerra, 2000). Tiene como propósito reducir la pérdida de humedad, mejorar las condiciones de germinación y la estabilidad estructural de los agregados

superficiales por el aumento en el contenido de materia orgánica, estimula la actividad biológica del suelo y reduce el enmalezamiento (FAO –IITA, 1997).

- **Cultivos múltiples:** Optimizan espacial y temporalmente el uso de la tierra, asociados o imbricados; constituyen una opción para el control de la erosión, debido a que involucra varios estratos de protección, la prolongación del ciclo protegido y/o la densidad de la cobertura.
- **Re-vegetación y/o Reforestación:** Los trabajos de re-vegetación y reforestación en terrenos desprovistos de cobertura vegetal con vocación forestal deben ser considerados como prioritarios. El mantenimiento de la vegetación espontánea de los estratos arbustivo, subarbustivo o herbáceo, relictos de vegetación arbórea, deben ser un condicionamiento en la planificación de los trabajos de restauración hidrológico-forestal (TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio de Medio Ambiente, 1998).

Para la restauración de la vegetación, la instalación de cubierta vegetal puede hacerse por dos métodos: plantación y siembra; la elección de uno u otro método dependerá del área a restaurar, de las características de las especies que se vayan a introducir y de las condiciones socioeconómicas.

Las siembras generalmente se deben utilizar para especies herbáceas y en menor proporción para leñosas, en algunos casos el uso de geotextiles es conveniente debido a que permite sujetar el suelo mientras se desarrolla la

cubierta vegetal. Cuando las condiciones del suelo son pobres (por humedad o fertilidad) o las márgenes de los cauces presentan taludes fuertes, suele sustituirse las siembras por hidrosiembras (mezcla de semilla, fertilizante, suelo y agua que se proyecta contra el talud).

3.3.2 Prácticas agronómicas

Se incluyen todas aquellas labores culturales, prácticas o técnicas aplicadas comúnmente a cultivos y pastizales, que directa o indirectamente inciden en la conservación del suelo. Diversos sistemas de cultivo y componentes se incluyen como prácticas agronómicas (Becerra, 2000):

- Preparación del terreno
 - Fecha y densidad de siembra
 - Uso de cultivos alternados y rotación
 - Fertilización orgánica
 - Barbechos de descanso
 - Control de malezas, plagas y enfermedades
 - Control de pastoreo
 - Uso y manejo adecuado del agua de riego
-
- **Labranza de conservación:** Para fines de conservación de suelos, generalmente es conveniente el sistema de agricultura o labranza de

conservación, que se basa en el fortalecimiento de procesos biológicos y naturales, se caracteriza por tres principios interrelacionados (FAO-IITA, 1997):

- Perturbación mínima del suelo.
- Cobertura permanente de la superficie del suelo con materiales orgánicos.
- Rotación diversificada de cultivos o una asociación de cultivos perennes.

En el sistema de labranza de conservación, los residuos de cultivos quedan en la superficie, producen un mantillo que protege el suelo del impacto de la lluvia, actúan como sumideros de CO₂, estabilizan la humedad del suelo, la temperatura y la estructura física del suelo (FAO-IITA, 1997).

- **Barbechos de descanso:** Técnica que consiste en el descanso del suelo cultivado durante cierto período en el marco de un sistema de rotación de cultivos, con el fin de conseguir la reconstrucción del suelo de forma natural (FAO, 1995).
- **Control de pastoreo.** Estrategias para conservar y restaurar el área de pastizal (Anaya, *et al.*, 1991):

- Excluir el pastoreo de áreas donde la cobertura vegetal sea menor del 50% y en superficies bajo regeneración natural o inducida.
- Seleccionar un sistema de pastoreo de acuerdo a las condiciones del suelo, composición de la vegetación, tipo y manejo de ganado.
- Utilizar barreras naturales para distribuir, concentrar y controlar el ganado.
- Ajustar el número de animales en las diferentes estaciones del año, a fin de evitar el sobrepastoreo.

3.3.3 Prácticas mecánicas

Consiste en movimientos de suelo y/o material subyacente, con el propósito de disminuir los escurrimientos superficiales y evitar la erosión en terrenos con pendiente (CONAFOR, 2007). Prácticas mecánicas más comunes:

- **Surcado al contorno:** Consiste en el trazo de surcos en forma perpendicular a la pendiente, siguiendo las curvas de nivel; el agua no se infiltra inmediatamente en el terreno permanece acumulada a lo largo de los surcos por la barrera que forman los lomos y la vegetación establecida (Anaya *et al.*, 1991).

- **Surcado lister:** Consiste en establecer una serie de surcos dobles separados por un tope empastado y contruidos sobre curvas a nivel, con el objetivo de aprovechar al máximo el agua de lluvia, aumentan el índice de infiltración, evitan la erosión del suelo y permiten el desarrollo de pastizales (Anaya *et al.*, 1991).
- **Terrazas:** Estructuras de defensa formadas por un surco y el correspondiente bordo trazados paralelamente a la curva de nivel del terreno y en sentido perpendicular a la pendiente. Se emplea en regiones con baja precipitación pluvial y en los casos en que resulten insuficientes medidas como: Laboreo a nivel, fajas o cubierta vegetal (TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio de Medio Ambiente, 1998; Anaya *et al.*, 1991).
- **Según su construcción**
 - **Terraza de tierra** (Figura 1)
 - **Terraza de piedra** (Figura 2)
 - **Terraza de muro vivo** (Figura 3)

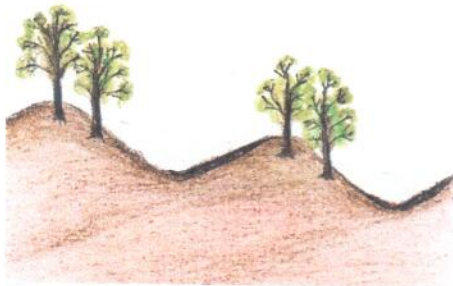


Figura 1. Terraza de tierra.

Fuente: (TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio de medio Ambiente, 1998;
Modificado por Franco Islas)

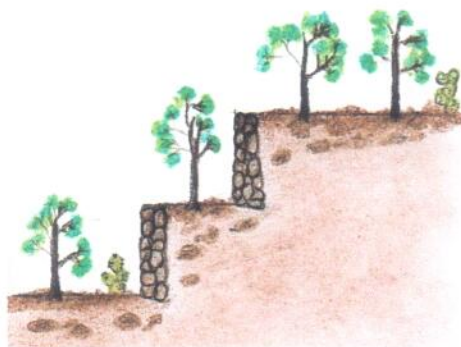


Figura 2. Terraza de piedra.
Fuente: (Anaya *et al.*, 1991;
Modificado por Franco Islas)

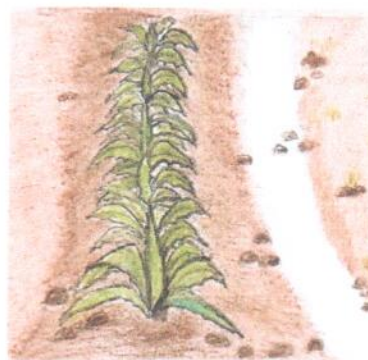


Figura 3. Terraza de muro vivo
Fuente: (CONAFOR, 2007;
Modificado por Franco Islas)

- **Según su función**

- **Terrazas de formación sucesiva** (Figura 4)
- **Terrazas de absorción** (Figura 5)

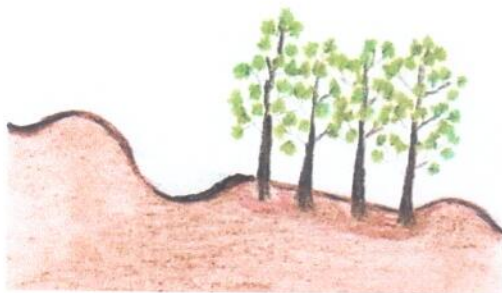


Figura 4. Terraza de formación sucesiva
Fuente: (TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio de medio Ambiente, 1998;
Modificado por Franco Islas)

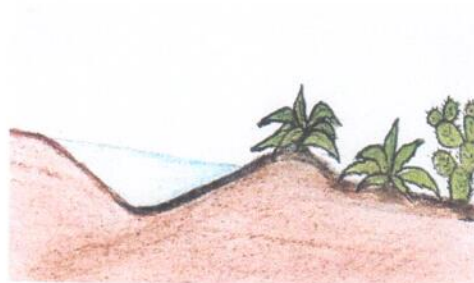


Figura 5. Terrazas de absorción
Fuente: CONAFOR, 2007; TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio de Medio
Ambiente, 1998; *Modificado por Franco Islas*

- **Según su forma**
 - **Terraza de banco** (Figura 6)
 - **Terraza individual** (Figura 7)



Figura 6. Terrazas de banco
Fuente: TRAGSA, TRAGSATEC y
Ministerio de medio Ambiente 1998;
Modificado por Franco Islas



Figura 7. Terraza individual
Fuente: CONAFOR 2007;
Modificado por Franco Islas

La elección del tipo de terrazas está en función de los siguientes factores:

1. Pluviometría
2. Pendiente del terreno
3. Tipo de vegetación
4. Características del suelo
5. Medios de construcción disponible

La eficiencia de un sistema de terraceo depende de otras prácticas conservacionistas como plantación al contorno, en fajas, cobertura del suelo, condiciones del área, dimensionamiento, construcción, funcionalidad y seguridad de éste (Rufino, 1989 *citado por* FAO-IITA, 1997).

- **Sistema zanja bordo:** Estructuras formadas por una zanja y un bordo aguas abajo (CONAFOR, 2007), se construyen en sentido perpendicular a la pendiente. Para consolidar el bordo se plantan especies arbóreas y arbustivas y en los diques establecer pastos (Anaya *et al.*, 1991) (Figura 8).
 - **Zanja trinchera** (Figura 9)
 - **Zanjas derivadoras de escorrentía** (Figura 10)



Figura 8. Zanja bordo.

Fuente: (CONAFOR, 2007; Anaya *et al.*, 1991; Modificado por Franco Islas)



Figura 9. Zanja trinchera



Figura 10. Zanja derivadora de escorrentía

Fuente: (CONAFOR, 2007; Anaya *et al.*, 1991; Modificado por Franco Islas)

- **Cepa común:** Consiste en abrir una oquedad para colocar la planta, las dimensiones mínimas son 0.30 m x 0.30 m x 0.30 m. La apertura se realiza a distancias recomendadas de acuerdo a la especie y siguiendo las curvas a nivel (Figura 11).

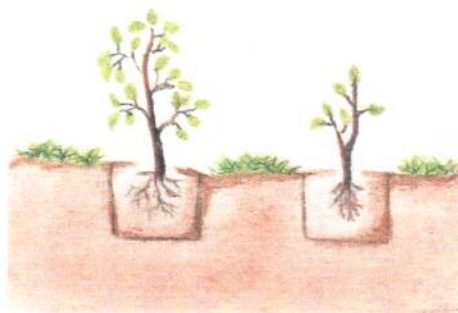


Figura 11. Cepa común.

Fuente: (Anaya *et al.*, 1991; *Modificado por Franco Islas*)

El laboreo de la tierra y las prácticas mecánicas, favorecen el proceso de infiltración; en general el sistema de terrazas, roturación y cultivos en contorno o cualquier otra técnica que reduzca la velocidad de la escorrentía incrementa la infiltración por el hecho de que se tiene más tiempo para infiltrarse (Anaya *et al.*, 1991).

3.3.4 Hidrotécnicas

Obras de estructura transversal o longitudinal para el control de erosión en cárcavas, corrección y restauración de cauces (CONAFOR, 2007). Se clasifican como temporales y permanentes, comúnmente se conocen como presas de control de azolves (Anaya *et al.*, 1991).

Se denomina cárcava al estado más avanzado de la erosión en surcos, es la más perceptible y tiene su origen en el escurrimiento superficial que se

concentra en sitios irregulares o depresiones superficiales del suelo desprotegido o mecanizado inadecuadamente (FAO-IITA, 1997).

Según Alves (1978) citado por (FAO-IITA, 1997), las cárcavas se clasifican en:

- **Pequeñas:** Menor a 2.5 m de profundidad y menor a 10 has de área de aportación.
- **Medianas:** 2.5 a 4.5 m.de profundidad y área de aportación de 10 a 50 has.
- **Grandes:** Mayor a 4.5 m. de profundidad y área de aportación mayor a 50 has.

Con relación al tamaño y forma de la cárcava se recomienda implementar las siguientes acciones (FAO-IITA, 1997):

- a) **Cárcavas pequeñas:** Pueden estabilizarse sembrando gramíneas o especies forrajeras; si el área es de protección, plantar especies arbóreas y arbustivas de rápido crecimiento y adaptadas a la región.
- b) **Cárcavas medianas y grandes:** Utilizar estructuras temporales o permanentes. Se recomienda la construcción de varias estructuras a lo largo del lecho, distribuidas a intervalos uniformes o en posiciones estratégicas de manera que faciliten el crecimiento de vegetación en los mismos.

- **Cabeceo de cárcavas:** Es la prevención y detención de la erosión remontante para evitar el crecimiento de una cárcava aguas arriba (Anaya *et al.*, 1991). Se recomienda cubrir la cárcava con tierra o rocas. Una vez recubierta proceder a la nivelación con relación a las áreas adyacentes e implementar prácticas conservacionistas (FAO-IITA, 1997).
- **Estabilización de la cárcava:** Consiste en suavizar los taludes para impedir que el desbarrancamiento continúe; si la regeneración natural no fuera suficiente para su control, se deberá realizar la plantación de algún tipo de vegetación en función del uso del área (FAO-IITA, 1997) (Figura 16).
- **Estructuras temporales:**
 - **Presa de ramas** (Figura 12)
 - **Presa de malla de alambre** (Figura 13)
 - **Presa de morillos** (Figura 14)
 - **Presa de geotextiles** (Figura 15)



Figura 12. Presa de ramas.
Fuente: CONAFOR, 2007;
Modificado por Franco Islas



Figura 13. Presa de malla de alambre
Fuente: CONAFOR, 2007;
Modificado por Franco Islas



Figura 14. Presa de morillos.

Fuente: (CONAFOR, 2007; *Modificado por Franco Islas*)



Figura 15. Presa de geotextiles

Fuente: CONAFOR, 2007;
Modificado por Franco Islas

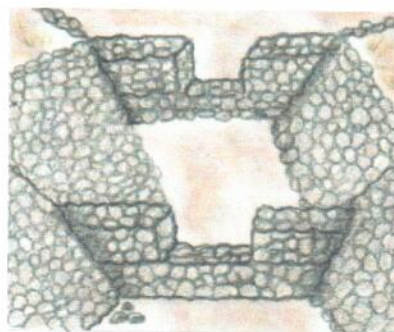


Figura 16. Protección de taludes

Fuente: CONAFOR, 2007;
Modificado por Franco Islas

- **Estructuras permanentes:**

- **Presa de piedra acomodada** (Figura 17)
- **Presa de gaviones** (Figura 18)
- **Presa de mampostería** (Figura 19)



Figura 17. Presa de piedra acomodada.

Fuente: CONAFOR, 2007; *Modificado por Franco Islas*



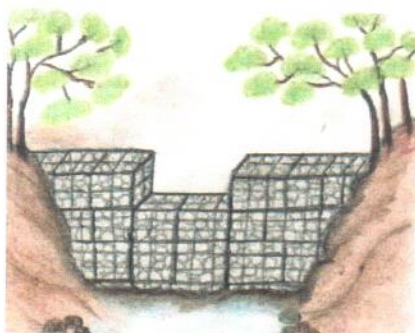


Figura 18. Presa de gaviones.

Fuente: CONAFOR, 2007; *Modificado por Franco Islas*



Figura 19. Presa de mampostería

Fuente: CONAFOR, 2007; *Modificado por Franco Islas*

Cada tipo de presa de control de azolves presenta ventajas y desventajas, puede ser adecuada para determinadas condiciones y recursos disponibles (Cuadro 2).

Cuadro 2. Presas de control de azolves.

Tipo	Cuencas (Tamaño)	Cárcava (Tamaño)	Altura	Costo	Otras características
Ramas	Pequeñas	Pequeñas	1 m	Bajo, si hay vegetación en la zona de trabajo	Fácil de construir poco durable
Morillos	Pequeñas y medianas	Pequeñas o angostas	3 m	Bajo en áreas forestales	
Malla	Pequeñas	Pequeñas o angostas	1.5 m	Relativamente bajo	Fácil de construir
Piedra acomodada	Pequeñas y mediadas	Pequeñas o angostas	3 m	Moderado	Recomendable donde hay piedra
Gaviones	Cualquier tamaño	Cualquier tamaño	> 10 m	Alto	Alta durabilidad y eficiencia
Mampostería	Cualquier tamaño	Cualquier tamaño	> 10 m	Muy alto	Alta durabilidad y eficiencia

FUENTE: Becerra, 2000.

3.3.5 Técnicas para captación de agua de lluvia

La captación de agua de lluvia es una técnica de preparación del suelo asociada al almacenamiento de agua de lluvia proveniente del escurrimiento superficial (FAO, 1997). En las zonas áridas y semiáridas donde se practica la captación de los escurrimientos superficiales, se tiene una forma permanentemente productiva con la conservación del suelo y agua (FAO-IITA, 1997).

La tecnología sobre captación de agua de lluvia es especialmente relevante para zonas en donde los problemas de degradación ambiental, sequía y presión sobre el recurso agua es más evidente. Un sistema de captación de agua de lluvia consiste en dedicar una parte del terreno al escurrimiento del agua y otra para almacenarla (Anaya *et al.*, 1991). Para establecer un sistema de captación de agua de lluvia, es necesario considerar los factores suelo, topografía, cantidad y distribución de las lluvias, disponibilidad de recursos y mano de obra (FAO-IITA, 1997).

Técnicas de captación de agua de lluvia:

1. Sistema de microcaptación (Captación *in situ*):

- Captación de flujo superficial para distancias cortas del área de escurrimiento entre 1 y 30 m.

a) **Microcaptación Negarim:** Área de captación en forma de diamante cuya base está rodeada por bordos pequeños de tierra con una oquedad de infiltración en la esquina más baja (Figura 20).

b) **Bordos al contorno:** Bordos de tierra dispuestos en forma paralela con un espaciamiento de 5 a 10 m en forma perpendicular el bordo aguas arriba se subdivide en pequeñas represas de tierra quedando microcaptaciones individuales (Figura 21).

c) **Bordos semicirculares:** Terraplenes de tierra en forma de semicírculo. Son utilizados para la rehabilitación de agostaderos y riego en plantaciones (Figura 22).



Figura 20: Microcaptaciones Negarim

Fuente: FAO, 1997; *Modificado por Franco Islas*



Figura 21. Bordos al contorno

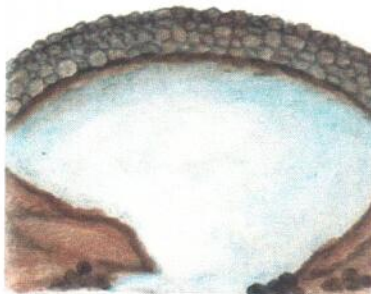


Figura 22. Bordos semicirculares

Fuente: FAO, 1997; *Modificado por Franco Islas*

2. **Sistema de captación externa (Captación ex situ):** Técnicas para mayores longitudes en el área de captación.

- Captación y aprovechamiento de aguas de escurrimiento.
- Área de captación generalmente de 30 a 200 m de longitud.

a) **Bordos trapezoidales:** Consiste en un bordo base conectado a paredes laterales, tres lados de una parcela son cerrados por bordos, mientras que el cuarto lado aguas arriba se abre para permitir la entrada del escurrimiento superficial (Figura 23).

b) **Bordos de piedra al contorno:** Reducen la velocidad del escurrimiento superficial, favorecen la infiltración y captura de sedimentos. Consiste en la construcción de líneas de piedra con una altura de 25 cm y una base de 35 a 40 cm en sentido perpendicular a la pendiente, siguiendo las curvas de nivel (Figura 24).



Figura 23. Bordos trapezoidales

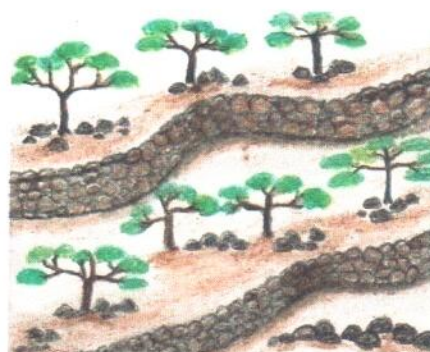


Figura 24. Bordos de piedra al contorno

Fuente: FAO, 1997; *Modificado por Franco Islas*

3. **Sistemas de inundación (Derivación y distribución de torrentes):**

- Área de captación de varios kilómetros

a) Bordos derivadores de esorrentía: Adecuado en donde la descarga de los escurrimientos superficiales son altos. Consiste en una serie de bordos escalonados cada uno con un ala corta simple aguas arriba, que esparce el flujo gradualmente aguas abajo. Los cultivos son plantados entre los bordos (Figura 25).

b) Presas permeables de piedra: Técnica de inundación. Las estructuras son típicamente largas, con paredes de baja altura a través de los valles, la parte central de la presa es perpendicular al cauce, las extensiones del muro van perpendiculares a las curvas de nivel (Figura 26).

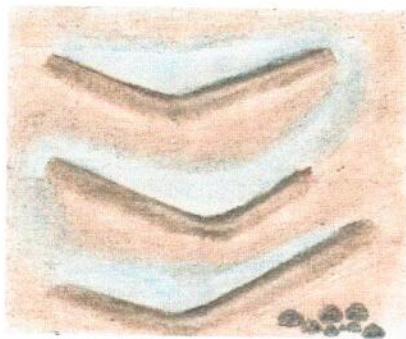


Figura 25. Bordos derivadores
Fuente: FAO, 1997;
Modificado por Franco Islas

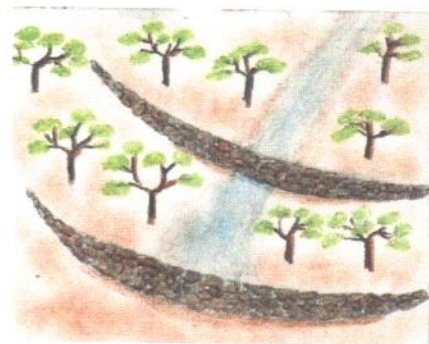


Figura 26. Presas permeables
Fuente: FAO, 1997; *Modificado por Franco Islas*

3.4 Zonificación para la restauración hidrológico-forestal

La zonificación, se refiere a la delimitación de aquellas áreas prioritarias y homogéneas para la restauración del suelo y vegetación que requieren la elección de técnicas, especies, preparación del terreno, plantaciones y/o reforestación para su recuperación (TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio de Medio Ambiente 1998).

La zonificación debe realizarse teniendo presente el concepto de cuenca como unidad ecológica en todas las actividades de restauración hidrológico-forestal, para que éstas sean eficientes y se puedan conseguir los objetivos de control de la erosión, provisión hídrica y protección de las áreas (Simon, N. E., 1992).

3.4.1 Áreas ribereñas

La restauración de áreas ribereñas tiene como objetivo retornar el cauce a un estado próximo al natural. En primer lugar se debe recuperar la llanura de inundación y las riberas fluviales con vegetación y en segundo término la recuperación de la morfología del cauce por medio de prácticas vegetativas y estructuras permanentes o temporales (González del Tánago y García de Jalón, 1998).

Un primer paso en la restauración de los cauces es la delimitación del espacio ripario con bandas protectoras de vegetación en cada margen (González del Tánago y García de Jalón, 1998), en los tramos medios donde predomina la acumulación de sedimentos establecer especies estoloníferas, en tramos donde la erosión es fuerte, establecer comunidades arbóreas con gran capacidad de rebrote (TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio de Medio Ambiente 1998).

En la zonificación para la restauración de riberas, la vegetación a recuperar debe ser heterogénea, imitando las distribuciones de individuos observados en tramos análogos, la vegetación de ribera debe quedar conectada funcionalmente al cauce. La restauración debe ser orientada a corregir la formación de bosques de galería continuos y con una cierta anchura (TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio de Medio Ambiente 1998; González del Tánago y García de Jalón, 1998).

La revegetación de áreas riparias se logra de forma natural en un tiempo más o menos breve. La plantación o siembra de preferencia con especies nativas de crecimiento rápido permiten acelerar el proceso de recuperación de dichas áreas y debe llevarse a cabo después de la restauración morfológica del cauce (González del Tánago y García de Jalón, 1998).

3.4.2 Vertientes

Para la recuperación de la cubierta vegetal en pendientes, es importante definir el tipo y objetivo de la repoblación vegetal. La elección de las especies debe estar orientada hacia la estructura y funcionalidad de los ecosistemas, además tomar en cuenta que las especies seleccionadas son el punto de partida para conseguir la mayor diversidad y heterogeneidad posible del área a restaurar (TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio de Medio Ambiente, 1998).

Se deben considerar aquellas zonas afectadas por el proceso de pérdida de cubierta vegetal, erosión hídrica muy elevada, donde el factor agua es limitante para el desarrollo de las especies, presencia de suelos pobres que sustentan cubierta vegetal muy degradada y escasa.

Las áreas con pendiente son las de mayor representación en los proyectos de restauración hidrológico-forestal; debido a que en ellas son más evidentes los procesos de pérdida de suelos por la intensidad y velocidad de los escurrimientos superficiales por la falta de cobertura vegetal. Para la implementación de prácticas mecánicas e hidrotecnias en estas áreas se debe especificar las variables de hidrología superficial, tipo y uso del suelo, pendiente, porcentaje de cobertura de las comunidades vegetales existentes y prácticas de conservación de suelos llevadas a cabo.

3.4.3. Áreas de bosques

Con la finalidad de controlar el proceso erosivo, es necesario que el objetivo del manejo del bosque se sustente en bases biológicas que permitan la regeneración de la nueva masa arbórea y la protección del suelo. Dichas bases biológicas, deben estar orientadas a mantener los estratos arbóreos, arbustivos y herbáceos; así como la capa de mantillo y humus formada por residuos vegetales orgánicos en distintas fases de descomposición (Anaya *et al.*, 1991).

En la zonificación de áreas forestales para la restauración hidrológico-forestal, deben considerarse aquellas áreas de bosque en donde los sitios que por su clasificación de uso presenten problemas de densidad en la cobertura forestal o presenten altos índices de aportación de sedimentos.

Es imprescindible que al plantear la propuesta de restauración de un área forestal se defina la estructura y función de la vegetación a recuperar, diseñar mezclas tipo en las que se definan especies arbóreas, arbustivas y herbáceas; distribución, densidad y espaciamiento de las plantas, dividir el área en rodales, polígonos o parcelas con características y problemáticas homogéneas. A cada área delimitada, asignar la mezcla tipo y técnica de recuperación más idónea para conseguir los objetivos planteados en la propuesta de restauración hidrológico-forestal (TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio de Medio Ambiente 1998).

3.4.4. Áreas de pastizal

Los pastizales son el recurso más eficaz en la formación y protección del suelo contra los procesos erosivos, cuando las raíces, tallos y hojas constituyen una cubierta densa y vigorosa. Son áreas cuya cubierta vegetal está constituida por gramíneas, hierbas y arbustos forrajeros que generalmente son utilizados a través del pastoreo libre, favoreciendo la existencia de áreas parcial o totalmente desprovistas de vegetación (Anaya *et al.*, 1991).

En la ordenación de cuencas se debe hacer compatible, siempre que sea posible, las repoblaciones vegetales a acotar y la superficie dedicada al pastoreo. En la medida de lo posible, se deben desarrollar actividades como recuperación y mejoramiento de pastizales; así como la revegetación de áreas abandonadas por medio de siembra de gramíneas, leguminosas y pastizales nativos.

En la zonificación de áreas de pastizal natural o inducido, es importante detectar las áreas sujetas a pastoreo que presenten menos del 50% de cubierta vegetal, con el propósito de acotarlas e implementar técnicas vegetativas, prácticas mecánicas, agronómicas e hidrotecnias que permitan su recuperación y conservación.

3.4.5 Áreas para captación de agua de lluvia

La capacidad de los suelos para mantener y liberar niveles adecuados de humedad a las plantas, es vital en el proceso de captación de agua de lluvia. En la zonificación de áreas para captación de agua de lluvia se deben considerar factores como régimen de lluvia, pendiente y tipo de suelo (FAO-IITA, 1997). Los suelos de textura media, son más apropiados para establecer sistemas de captación de agua de lluvia, en función de su capacidad de almacenamiento (FAO-IITA, 1997).

3.5. La regeneración en la restauración hidrológico-forestal

La recuperación y mantenimiento de la cubierta vegetal dentro de la cuenca hidrológica, se realiza mediante los procesos de regeneración natural o inducida (Anaya, *et al.*, 1991):

- **Regeneración natural:** Proceso natural mediante el cual se establece una nueva cubierta vegetal en parte o toda un área. Se realiza en el transcurso de cierto tiempo, inicia después de cierto disturbio natural o antropogénico y finaliza hasta que un número de individuos se establecen y adaptan a las condiciones ambientales del lugar.

- **Regeneración inducida:** Proceso que se realiza a través de la siembra de especies herbáceas y plantación de especies arbóreas y arbustivas, que en mayor o menor grado presenten problemas en su densidad. Se procederá a la plantación inducida sólo en aquellos casos en que la regeneración natural no logre en tiempo, cantidad y calidad los objetivos de restauración y conservación del suelo.

3.6. Elección de especies para la restauración hidrológico-forestal

La elección de especies, distribución, densidad y estructura debe diseñarse de acuerdo con las áreas a restaurar, tomando en cuenta que el objetivo prioritario es la restauración y conservación del suelo.

En la elección de especies es necesario considerar las características de crecimiento, desarrollo radical, vigor, compatibilidad de asociación con otras especies, resistencia a plagas, enfermedades y otras características morfológicas que impliquen un uso específico o futura utilidad (Anaya, *et al.*, 1991). Siempre que se pueda, es mejor introducir el mayor número de especies nativas posibles formando mezclas tipo para cada área a restaurar; ya que la diversidad es una de las características de estabilidad en los ecosistemas.

En la plantación de las especies, las técnicas de preparación del suelo deben estar enfocadas a facilitar la adaptación de éstas, alterando al mínimo los perfiles y la estructura del suelo (TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio de Medio Ambiente, 1998). Generalmente los suelos sujetos a repoblación inducida presentan problemas de retención de humedad, drenaje, erosión, etc., por lo que se sugiere la realización de prácticas mecánicas para el establecimiento de la vegetación como el sistema de cepa común, zanja bordo y terrazas.

3.7 La Cuenca hidrográfica

El concepto de cuenca se define como una zona o sistema comprendido dentro de ciertos límites físicos o divisorios, indicada por procesos como el sistema de drenaje y unidades de manejo. De acuerdo con el grado de complejidad e interrelación entre los diversos componentes, ésta puede ser manejada y controlada con estructuras físicas, coberturas vegetales o simplemente mantenerse en las condiciones naturales o de alteración antropogénica como ocurre en los países en desarrollo (Granados, *et al.*, 2006).

Una cuenca es una zona de la superficie terrestre cuyos escurrimientos drenan hacia un mismo punto de salida. Si se consideran los escurrimientos superficiales, la cuenca se denomina hidrográfica; si incluye a los escurrimientos subterráneos se denomina Cuenca hidrológica (Becerra, 2000).

Son unidades jerárquicas en las que se emplean clasificaciones con base a su tamaño (Cuadro No.1).

Cuadro 3. Clasificación de las cuencas hidrográficas

Área (km ²)	Tamaño
<500	Muy chica
500-2000	Chica
2000-10000	Mediana
10000-20000	Medianamente grande
20000-100000	Grande
>100000	Muy grande

Fuente: SEMARNAT, 2000

La cuenca constituye una unidad espacial ecogeográfica relevante para analizar los procesos y funciones ambientales generados, tales como (INE, 2003):

A. Función hidrológica

1. Captación de agua de las diferentes fuentes de precipitación para formar escurrimientos superficiales.
2. Almacenamiento de agua en el perfil del suelo y subsuelo.

B. Función Ecológica

1. Proveer de hábitat para la flora y fauna.

C. Función ambiental

1. Constituyen zonas de captura de CO₂
2. Alberga bancos de germoplasma
3. Regulación de la recarga hídrica
4. Conservación de la biodiversidad
5. Regulación del clima y amortiguamiento del impacto de los fenómenos naturales.
6. Reservorios de oxígeno
7. Degradación y reciclaje de desechos orgánicos.
8. Generación, conservación y recuperación de suelos.
9. Provisión de agua.

D. Función socioeconómica

1. Proporciona recursos para el desarrollo de actividades productivas.
2. Brindar un espacio para el desarrollo social y cultural.
3. Paisaje y recreación.

De particular importancia en el manejo de cuencas hidrográficas, es lo relativo a las acciones destinadas a la restauración, conservación, mejora e implantación de cubiertas forestales arbóreas, arbustivas y herbáceas, no sólo para la conservación del suelo, sino también por la cantidad y calidad de agua (TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio de Medio Ambiente, 1998).

3.7.1 Variables hidrológicas

Del total del agua que llega al suelo bajo la forma de precipitación, una parte se infiltra y el resto forma las escorrentías, concentrándose en las depresiones naturales del terreno, escurriendo hasta encontrar áreas de deposición natural (FAO, 2007). La determinación de los escurrimientos superficiales es básico en estudios sobre erosión hídrica, en la planeación y ejecución de acciones de restauración y conservación de suelos y agua (Becerra, 2000).

Si el objetivo es la conservación y restauración de suelos se estiman los escurrimientos máximos instantáneos para el diseño y construcción de obras para la restauración de cauces y control de cárcavas. Si el objetivo es retener o almacenar agua, se calcula el escurrimiento superficial medio (Anaya *et al.*, 1991; FAO, 1997).

El método denominado número de curva de escorrentía CN, (Soil Conservation Service, 1972), se utiliza para calcular los parámetros hidrológicos de un evento o tormenta (precipitación en 24 horas): Retención potencial máxima (I_a), índice de infiltración o infiltración potencial (S), escurrimiento superficial medio (Q) y escurrimiento máximo instantáneo (Q_p) (Monsalve, 2006).

El parámetro definido como número de curva de escorrentía (CN) que varía en un rango de 1 a 100, considera parámetros tales como: Condición hidrológica

del suelo y cobertura vegetal, métodos de conservación del suelo y condición de humedad antecedente del suelo (Monsalve, 2006).

- **Cobertura vegetal:** El grado de cobertura es muy variable, dependiendo del tipo de vegetación, densidad, vigor, etapa fenológica entre otros. En relación con su efecto amortiguador sobre la escorrentía o efecto hidrológico, comúnmente se clasifica en Buena, Regular o Mala (Becerra, 2000).
- **Características del suelo.** El suelo es un componente básico de los ecosistemas, cuyas características físicas determinan la magnitud y/o modalidad de los escurrimientos superficiales. Las características del suelo que se relacionan con la escorrentía son la textura y el contenido de materia orgánica que influyen en la velocidad de infiltración, la permeabilidad y el drenaje del suelo (Becerra, 2000).

Cuadro 4. Potencial de escurrimiento de los suelos

Grupo	Potencial de escurrimiento	Velocidad de infiltración	Textura	Drenaje	Permeabilidad
1	Bajo	Alta	Gruesa	Bueno	Alta
2	Moderadamente bajo	Moderadamente alta	Gruesa-medias	Moderado	Moderada
3	Moderadamente alto	Moderadamente baja	Medias-finas	Moderado-lento	Moderada
4	Alto	Baja	Arcillas expandibles	Lento	Lenta

Fuente: (Anaya *et al.*, 1991)

3.7.2 Sedimentos aportados

Los sedimentos son partículas sólidas de suelo que se originan por diferentes tipos de erosión que ocurre en los terrenos con pendiente, desprovistos de vegetación y en los sistemas de drenaje de la zona de aportación. Pueden ser medidos por la cantidad depositada directamente en represas o sedimentos en suspensión en estaciones de aforo; sin embargo por la falta de infraestructura, generalmente se usan modelos predictivos.

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (Universal Soil Loss Equation) (USLE, Wischmeier y Smith, 1978), es un modelo predictivo para estimar la pérdida de suelos promedio por un período de tiempo representado, generalmente un año.

Otro enfoque para estimar el rendimiento de sedimentos de cuencas fue adoptado por Williams (1975), quien desarrolló la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (EUPSM). La EUPSM es un modelo de parámetros agrupados que estima el rendimiento de sedimentos de cuencas para un evento pluvioso único. Utiliza un factor de escurrimiento para reemplazar el factor de energía pluviosa de la USLE (FAO, 1980; 1994).

Las Ecuaciones para predicción de pérdida de suelos, son modelos de parámetros agrupados, que utilizan información promedio sobre suelos,

cultivos, pendiente y manejo. Se usan como componentes de modelos matemáticos de simulación a nivel de campo y cuencas, capaces de proyectar una variedad de procesos biofísicos y sus interacciones (Jones, R. H., C. A., *et al.*, 1991).

El cálculo de la producción de sedimentos es un importante elemento de criterio para la toma de decisiones en el manejo integral de cuencas, pues los sedimentos provocan el azolve de presas y otros vasos de almacenamiento de agua, reduciendo la vida útil de las estructuras para la corrección y restauración de cauces (Becerra, 2000).

3.8 Los Sistemas de Información Geográfica en la Simulación de modelos de pérdida de suelos

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), son sistemas de información diseñados para trabajar con datos referenciados con coordenadas espaciales o geográficas. En general, el SIG puede ser definido como una herramienta para recolectar, exhibir, manejar, analizar y producir datos espacialmente georreferenciados (Berry, 1987).

Las herramientas de un SIG se pueden utilizar para numerosas finalidades tales como realizar análisis de sensibilidad en los modelos de simulación con base de datos espaciales (Arnold y Sammons, 1989; Heatwole, 1990; Shanholtz y

Zhang, 1989), mediante la manipulación de las variables del modelo y estudiar una superficie para distintas escalas/resoluciones y sus efectos en la exactitud de la predicción de dicho modelo (FAO, 1994).

Spanner *et al.*, (1982), menciona el uso de los SIG en la predicción de pérdida de suelo para un lugar particular, en toneladas por acre por año, estimada como una función multiplicativa de la precipitación, erodabilidad del suelo, gradiente de pendiente y longitud y prácticas de conservación. La erodabilidad como función de la localización fue estimada a partir de datos colectados, la longitud y gradiente de pendiente fueron calculados a partir del modelo de elevación digital y presentado en forma de un mapa.

El conocimiento de los modelos matemáticos predictivos de pérdida de suelo, constituye una herramienta importante de utilización para la proyección de escenarios, permite visualizar los factores que tienen influencia en el comportamiento de un sistema. Algunos modelos son simples ecuaciones que calculan el promedio anual de erosión en la desembocadura de una cuenca, otros son modelos complejos que simulan la erosión diaria y pueden aplicarse continuamente para calcular la erosión promedio en el largo plazo y las probabilidades de sus distribuciones (FAO, 1994).

En la predicción de escenarios, análisis y toma de decisiones para el manejo de cuencas en condiciones actuales, los SIG se realizan bajo diversos enfoques:

1. Empírico o agrupado - orientado hacia procesos
2. Diario - mensual - horarios diarios
3. Perfiles de suelo homogéneos - cuenca compleja.

El conocimiento de los modelos matemáticos predictivos de pérdida de suelo son importantes en la proyección de escenarios, su aplicación requiere del reconocimiento visual del terreno y la toma de datos mínimos necesarios para alimentarlos, sin los cuales se corre el riesgo de subestimar o sobreestimar dichos procesos. La validación y comprobación de estos modelos, requiere de la instalación de parcelas de campo representativas, previendo su operatividad para varios años de toma de datos (FAO, 1994).

Los Sistemas de Información Geográfica con versiones automatizadas de modelos de predicción, amplían las posibilidades de aplicarlos a problemas mayores y más complejos tanto temporal como espacialmente, tendiendo hacia la capacidad de simulación continua (FAO, 1994). La representación gráfica para visualizar la variación espacial y temporal de los datos en un SIG, constituyen herramientas que ayudan en los procesos de toma de decisiones en la planificación ambiental y de los recursos naturales (Bingner, 1989; Shoup y Becker, 1985; Barringer *et al.*, 1987).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Marco físico

Localización

La Delegación Milpa Alta se ubica en las coordenadas 19° 13' latitud norte, 19° 04' de latitud sur, al este 98° 57' y al oeste 99° 10'. Colinda al norte con las Delegaciones Xochimilco y Tláhuac, al este con los municipios de Chalco, Tenango del Aire y Juchitepec del Estado de México, al sur limita con los municipios de Tlalnepantla y Tepoztlán del Estado de Morelos, al oeste colinda con las delegaciones de Tlalpan y Xochimilco (INEGI, 2004) (Figura 27).

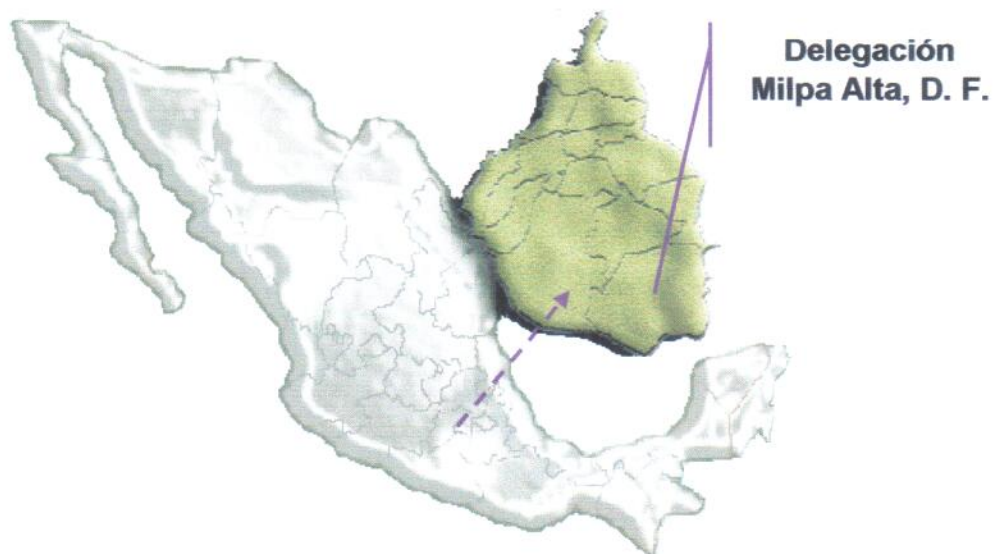


Figura 27. Mapa de localización, Delegación Milpa Alta, D. F.
Fuente: <http://www.siem.gob.mx>

Área de estudio

Delegación Milpa Alta, geográficamente comprende dos Microcuencas: Río Milpa Alta y Río Cilcuayo. La Microcuenca Río Milpa Alta (Figura 28), tiene una superficie de 6967.18 ha, limita al norte con la zona urbana de Tláhuac, al sur con la microcuenca Tláloc, al este con la microcuenca Cilcuayo y al oeste con la microcuenca Río San Gregorio. El 95% del territorio de ésta se localiza en la Delegación Milpa Alta en las comunidades de San Francisco Tecoxpa, San Agustín Ohtenco, San Jerónimo Miacatlán, San Juan Tepenahuac, Villa Milpa Alta, Santa Ana Tlacotenco, San Lorenzo Tlacoyucan y San Antonio Tecómitl; el 5% restante en la Delegación Tláhuac (San Juan Ixtayopan).

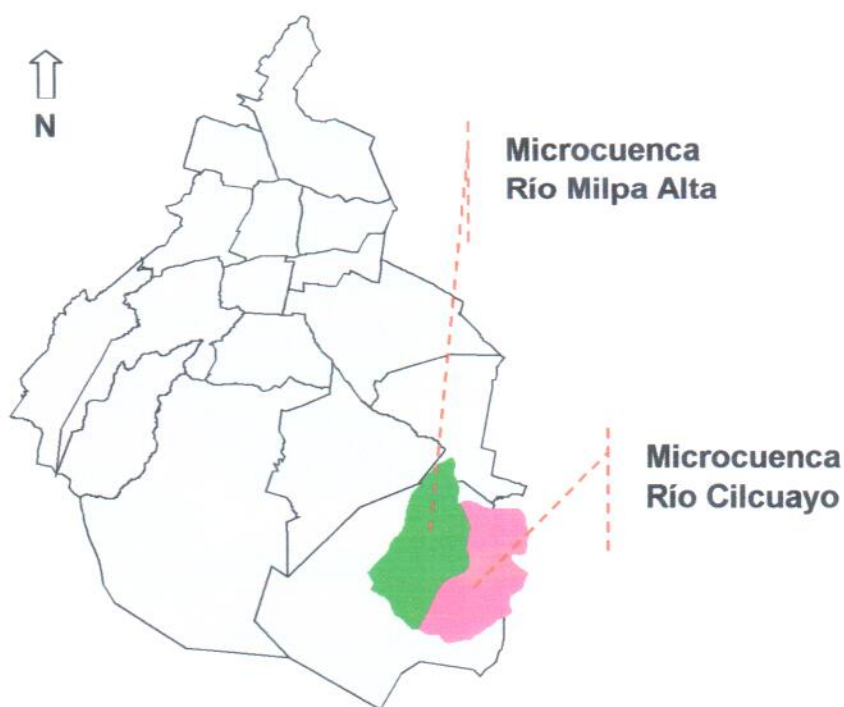


Figura 28. Mapa de localización del área de estudio
Fuente: SAGARPA, GDF, 2004.

La Microcuenca Río Cilcuayo (Figura 28), cuenta con una extensión de 6,036 has, 4,668 has (77%), se encuentra en la Delegación Milpa Alta, limita al norte con el poblado de San Antonio Tecómitl; al este parte del Estado de México (1368 has) hasta el cerro Ayaquemetl y Tezicalo, al oeste con la Microcuenca Río Milpa Alta, al sur en la cima de la Sierra del Chichinautzin (SAGARPA, GDF, FIRCO y CORENADER, 2004).

Clima

De acuerdo a la clasificación climática de Köppen (modificado por García, E., 1973), el área de estudio presenta el tipo de clima *C(w1)* Templado subhúmedo con lluvias en verano, *C(E)(w)* Semifrío subhúmedo con lluvias en verano y *C(E)(m)* Semifrío húmedo con abundantes lluvias en verano en la parte alta, temperatura media anual de 22° C y precipitación media anual de 731 mm (INEGI-GDF, 2004; CORENADER, 2004).

Fisiografía y Geología

La Microcuenca Río Milpa Alta y Río Cilcuayo, presentan una geoforma irregular, sus principales elevaciones: El volcán Tláloc (3650 msnm), Cilcuayo (3450 msnm) y el volcán San Miguel (3150 msnm), las partes bajas están a una altitud de 2150 msnm. Su formación geológica está comprendida por suelos de origen ígneo-extrusivo de andesita y formaciones de origen aluvial.

Suelos

Los suelos que conforman el área de estudio, en su mayoría son de origen volcánico, en algunas partes con afloramientos de rocas y otras con basaltos; suelos de poca profundidad, tendencia de pH ácido y una elevada erosión (SAGARPA, GDF, FIRCO y CORENADER, 2004).

Hidrología

La red de drenaje es de desarrollo pobre y se reduce al conjunto de corrientes superficiales del tipo efímero, asociados con los cerros Cilcuayo, Cerro del Agua y Tláloc; distinguiéndose por su longitud la corriente Tlatixhualanca, que nace al este del volcán San Miguel y corre al este de Santa Ana Tlacotenco, descargando al sur de San Antonio Tecómitl. Existen otras corrientes efímeras de menor longitud, asociadas a la vertiente norte del volcán Tláloc que descienden en dirección norte y que cambian hacia el noreste para confluir a Tecómitl (SAGARPA, GDF, FIRCO y CORENADER, 2004).

Vegetación

La Microcuenca Río Milpa Alta y Río Cilcuayo, son pobres en cubierta forestal. Los escasos manchones de bosque se presentan después de los 3100 msnm

de altitud. Son bosques de pino con cobertura del 40% y en la porción Este entre los 3300 a 3400 msnm, aparecen pequeños manchones con coberturas cercanas al 100% (Anexo: Tabla 5). La porción sur de la Microcuenca Río Cilcuayo, forma parte del Eje Neovolcánico Transversal; una de las regiones con mayor concentración de especies endémicas (SAGARPA, GDF, FIRCO y CORENADER, 2004).

La vegetación predominante en las dos microcuencas es del tipo de bosque templado frío, donde los elementos dominantes son: Pino (*Pinus*, spp), oyamel (*Abies religiosa*), pino-encino (*Pinus* spp-*Quercus* spp). En la zona media la vegetación forestal está representada por: cedro (*Cupressus lusitanica*), pirul (*Schinus molle*), chahuilisca y palo dulce (*Eysenhardtia polystachya*). Vegetación arbustiva como el nopal silvestre (*Opuntia* spp); entre los cultivos se encuentra el nopal de tuna (*Opuntia* spp) y nopal verdura (*Opuntia ficus indica*).

En la zona baja la vegetación forestal predominante es el encino (*Quercus* spp), madroño (*Arbutus* spp), nopal silvestre (*Opuntia* spp), pirul (*Schinus molle*), tepozán (*Buddleia cordata*), cedro (*Cupressus lusitanica*) y eucalipto (*Eucalyptus* spp). Árboles frutales: capulín (*Prunus serotina* ssp *capulli*), ciruelo (*Prunus domestica*), durazno (*Prunus persica*), tejocote (*Crataegus pubescens*), chabacano (*Prunus armeniaca*). Cultivos: nopal verdura (*Opuntia ficus indica*), maíz (*Zea mays*), maguey (*Agave* spp), frijol (*Phaseolus vulgaris*), haba (*Vicia faba*) y pastizales (SAGARPA, GDF, FIRCO y CORENADER, 2004).

Fauna

El área de estudio comprende una de las zonas faunísticas más importantes de la Montaña Sur de la Cuenca de México con cerca de 200 especies de aves, 9 de anfibios y 41 de reptiles. El área es hábitat de dos especies en peligro de extinción: El conejo teporingo (*Romerolagus diazi*) y el gorrión serrano (*Xenospiza baileyi*) (SAGARPA, GDF, FIRCO y CORENADER, 2004).

Uso actual del suelo

La Microcuenca Río Milpa Alta, comprende una zona boscosa en la parte alta, en la intermedia se desarrollan las actividades agrícolas para el monocultivo del nopal y aisladamente para maíz y avena; en la zona baja existe una agricultura menor. El uso pecuario es el menos extenso y se localiza al suroeste de la microcuenca, así como en pequeñas porciones alrededor del volcán Tláloc. El uso forestal se restringe a las laderas de los volcanes Ocusoyaco y Tláloc. El uso urbano se encuentra en la parte baja Ixtayopan y Tecómitl y en el centro (SAGARPA, GDF, FIRCO y CORENADER, 2004).

En la microcuenca Cilcuayo encontramos 2118.16 has para agricultura de temporal, pastizales con 497.67 has; bosques de oyamel, pino y pino encino con 2402.29 has (SAGARPA, GDF, FIRCO y CORENADER, 2004).

Actividad económica

La agricultura de temporal ocupa el 98% de la producción agrícola, principalmente al cultivo de: nopal, maíz y frijol y otros cultivos como cebada, amaranto, alberjón y hortalizas. Se cultivan frutales en pequeñas huertas: Limón persa y real, lima; granada, ciruelo, durazno, higo, entre otros, la producción se destina principalmente al autoconsumo y el excedente se comercializa. También se colecta madera, leña, plantas medicinales, aromáticas y hongos (SECOPS, 2000).

Problemática en el área de estudio

- Deforestación de las zonas altas por la tala clandestina.
- Sobrepastoreo, principal causa de la afectación de la regeneración natural e inducida.
- Avance de la frontera agrícola sobre suelo de uso forestal y la utilización de sistemas inadecuados de producción agrícola que favorecen el proceso de erosión (SAGARPA, GDF, FIRCO y CORENADER, 2004).

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Variables hidrológicas

Para determinar las variables hidrológicas en cada microcuenca, se aplicó la metodología de las Curvas Número (Aparicio, 2007; Campos, 1998), procesando las siguientes variables por polígono (3365 polígonos para la Microcuenca Río Milpa Alta y 467 Microcuenca Río Cilcuayo): Área, tipo de vegetación y porcentaje de cobertura, clasificación hidrológica del suelo; Curva numérica (CN), Antecedente de humedad, Curva numérica corregida (CNC); por estación, año y período lluvia (Mayo-Septiembre).

4.2.1.1 Delimitación del área de estudio

La delimitación del área de estudio se realizó con las cartas topográficas digitales E14A49 y E14B41, Escala 1:50 000 (INEGI, 2008), trazando el límite del área sobre los puntos de mayor altitud y la corriente principal que delimita la red hidrológica de la Microcuenca Río Milpa Alta y Río Cilcuayo, se tomó como referencia principal los polígonos por Microcuenca (CORENA Comisión de Recursos Naturales del Distrito Federal, 2005).

4.2.1.2 *Modelo de Elevación Digital*

Con los polígonos de las Microcuencas Río Milpa y Río Cilcuayo, se realizó el recorte de las curvas de nivel; posteriormente se hizo el procesamiento de los Modelos de Elevación Digital (MED) a 30 m, mediante la extensión *Spatial Analyst* en ArcView GIS 3.2.

4.2.1.3 *Simulación de la hidrología superficial*

Se utilizó la extensión *Hydrologic Modeling* v 1.1, para corrección del MED, posteriormente se hizo la determinación de la Dirección de flujo y flujo de acumulación para obtener la Simulación de la red hidrológica del área de estudio.

4.2.1.4 *Datos vectoriales*

1. **Área de cobertura y tipo de suelo:** Con el polígono de cada Microcuenca, se procedió a realizar el recorte de vegetación y edafología en los mapas de uso de suelo y vegetación y unidades edafológicas del Distrito Federal edición 2005 (CORENA Comisión de Recursos Naturales del Distrito Federal, 2005), (INEGI, 1980), para obtener los mapas vectoriales y las bases de datos correspondientes por unidad de cobertura de suelo.

2. **Porcentaje por tipo de cobertura:** Se determinó con la imagen satélite de uso de suelo y vegetación 2007 del área de estudio y las unidades de vegetación correspondientes a cada microcuenca, considerando los rangos de cobertura vegetal (Anexo: Cuadro 6). Posteriormente se realizó una asignación de datos edafológicos a la base de datos de vegetación para anexar el tipo de suelo y textura a cada polígono.
3. **Clasificación hidrológica de los suelos:** Se tomó como referencia el tipo de textura de cada unidad edafológica en cada polígono. La textura se obtuvo de la base de datos del mapa vectorial de edafología correspondiente a cada microcuenca y se aplicaron los criterios de clasificación hidrológica de suelos (Anexo: Cuadro 7).
4. **Curva numérica (CN):** Con base al uso de suelo, prácticas de conservación, condición hidrológica de la vegetación y clasificación hidrológica de los suelos; se determinó la curva numérica correspondiente a cada polígono (Anexo: Cuadro 8).
5. **Antecedente de humedad:** El Método de curva numérica, tiene tres niveles de humedad antecedente, dependiendo de la precipitación total en los cinco días previos a la tormenta. Condición de humedad antecedente *seca (I)*, *promedio (II)* y *húmeda (III)* (Monsalve, 2006) (Anexo: Cuadro 9).

Se utilizó el registro de precipitación diaria de los últimos diez años de registro de las estaciones meteorológicas del área de influencia a la zona de estudio (Anexo: Cuadro 16) obtenidos del Sistema ERIC III del Banco de Datos Histórico Nacional del Servicio Meteorológico Nacional (IMTA, 2006) y se aplicó el indicador de la Condición de humedad antecedente (Anexo: Cuadro 9).

6. **Curva numérica corregida (CNC):** Se obtuvo mediante la Interpolación con la tabla de condición de antecedente de humedad por evento, por estación y por polígono, aplicando la curva numérica corregida (Anexo: Cuadro 10).

4.2.2 Sistema de simulación para determinar variables hidrológicas

Se determinaron las variables hidrológicas: Retención inicial (I_a , mm), Infiltración potencial (S , mm), Escurrimiento medio (Q , mm) y Escurrimiento máximo instantáneo (Q_p , m^3/seg), por polígono y microcuenca, en un sistema de simulación matemática desarrollado en Lenguaje Borland C++ Builder 5. El manejo de la base de datos se realizó en Database desktop e instrucciones en lenguaje SQL y la representación gráfica de las variables hidrológicas se realizó en el Sistema de Información Geográfica ArcView 3.2.

A) Variables de entrada por polígono

Id=Identificador

A= Área (ha)

L= Longitud de la corriente principal (m)

H= Diferencia altitudinal (m)

P=Precipitación por evento (mm)

C=Porcentaje por tipo de cobertura del área hidrológica

GS=Grupo hidrológico de suelo

CN=Curva numérica

B) Variables procesadas por polígono

1. **Retención inicial (*I_a*):** Cantidad de lluvia máxima que puede ser absorbida por el suelo sin que se produzca escurrimiento. Se calculó aplicando la Ecuación 1 para áreas que presentan índices de lluvia no significativos (G. Aron, A. C. Miller y D. F. Lakatos, 1977 *citado por* Campos, 1998).

$$I_a = 0.10(S)$$

Ecuación: 1

Donde:

I_a= Retención de humedad

S= Infiltración potencial (mm)

- 2. Infiltración potencial:** Cantidad de lluvia que puede ser absorbida por el suelo. Se determinó con la Ecuación 2, en función del Número de Curva de Escurrimiento del Complejo Hidrológico Suelo-Cobertura (Campos, 1998).

$$S = \frac{25400}{CNC} - 254$$

Ecuación: 2

Donde:

S= Infiltración potencial (mm)

CNC= Curva numérica corregida

Se condicionó la variable de Infiltración potencial (S), para determinar si existe escurrimiento (Q):

Si $0.1 * S > P$, entonces $Q=0$

Si $0.1 * S < P$, entonces $Q>0$

- 3. Escurrimiento superficial medio (Q en mm):** Parámetro de importancia para determinar áreas de captación de agua. Se determinó aplicando la Ecuación 3.

$$Q = P_{ex} = \frac{\left(P - \frac{2540}{CNC} + 25.4\right)^2}{\left(P + \frac{22860}{CNC} - 228.6\right)} \quad \text{Ecuación: 3}$$

Donde:

Q = Esgurrimiento medio (mm)

P = Precipitación (mm)

CNc = Curva numérica corregida (adimensional) (Anexo: Cuadro 10)

Para determinar si la tormenta generó escurrimiento superficial, se aplicó la siguiente condición:

Si $P > 0.1$ (S), entonces: $Q > 0$, existe escurrimiento

Si $P < 0.1$ (S), entonces $Q = 0$, no existe escurrimiento

4. **Coficiente de escurrimiento superficial (C):** Es el porcentaje del agua de lluvia que no es interceptado o infiltrado y que escurre hasta el sitio de interés (Anaya *et al.*, 1991) Ecuación 4.

$$C = \frac{Q}{P} \quad \text{Ecuación: 4}$$

Donde

C = Coficiente de escurrimiento (adimensional)

Q = Esgurrimiento medio (mm)

P = Precipitación (mm)

5. **Tiempo de concentración (Tc):** Tiempo de duración de una tormenta.

Se utilizó la Ecuación 5.

$$T_c = (0.02 \frac{L^{1.15}}{H^{0.385}})$$

Ecuación: 5

Donde

T_c = Tiempo de concentración (min)

L = Longitud de la corriente principal (m),

H = Diferencia altitudinal entre el sitio más elevado y la boquilla de la cuenca o donde se ubique la obra de conservación.

6. **Intensidad de lluvia (I):** Es la altura de la precipitación (mm), para un intervalo dado. Se determinó aplicando la Ecuación 6.

$$I = \frac{P}{T_c}$$

Ecuación: 6

Donde:

I = Intensidad de la precipitación (mm/hr)

P = Precipitación pluvial (mm)

T_c = Tiempo de concentración del escurrimiento (hr)

7. **Escorrentamiento máximo instantáneo:** Necesario para el diseño de obras de conservación de suelos. Se aplicó la ecuación del método racional modificado para un evento. (Ecuación. 7)

$$Qp = \frac{CIA}{360}$$

Ecuación: 7

Donde:

Qp = Escorrentamiento máximo (m^3/seg)

C = Coeficiente de escorrentamiento

A = Área por polígono (ha)

I = Intensidad de lluvia (mm/ha)

360= Factor de ajuste de unidades

4.2.3. Sistema de simulación para cálculo de sedimentos aportados

Para calcular los sedimentos aportados a una sección del cauce por evento, se aplicó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (FAO, 1980) (Ecuación 8), a través de un sistema de simulación matemática desarrollado en Lenguaje Borland C++ Builder 5. El manejo de la base de datos se realizó en Database Desktop y la representación gráfica de los índices de pérdida de suelo se realizó a través del Sistema de Información Geográfica ArcView GIS 3.2.

$$Y = 11.8(Q * Qp)^{0.56} K * LS * C * P$$

Ecuación: 8

Donde

Y= Sedimentos aportados a una sección del cauce para una tormenta determinada sobre la cuenca (ton/ha)

Q= Escurrimiento medio (mm)

Qp= Escurrimiento máximo instantáneo (m³/seg)

K= Erosionabilidad del suelo (t ha hr MU⁻¹ mm⁻¹ ha⁻¹)

L= Longitud de la pendiente (adimensional)

S= Grado de la pendiente (adimensional)

C= Cobertura vegetal (adimensional)

P= Prácticas mecánicas de control de la erosión (adimensional)

a) Variables de entrada:

- **Escurrimiento medio (Q):** Obtenido a través de la metodología de curvas numéricas por evento y por polígono.
- **Escurrimiento máximo instantáneo (Qp):** Obtenido por medio de la metodología de curvas numéricas por evento y por polígono.
- **Erosionabilidad del suelo (K):** Se determinó aplicando el índice propuesto por FAO (1980), (Anexo: Cuadro 11), a la base de datos vectoriales del mapa edafológico de cada polígono y microcuenca.

- **Factor LS (Longitud y grado de la pendiente):** Se determinó aplicando la siguiente ecuación:

$$LS = \left[\frac{\lambda}{22.13} \right]^m (0.065 + 0.0454S + 0.0065S^2)$$

Ecuación: 9

Donde

LS= Factor longitud de la pendiente (adimensional).

λ = Longitud de la pendiente (m).

m= Interacción longitud y grado de la pendiente (Anexo: Cuadro 12).

22.13= Valor estándar, parcela de observación.

S= pendiente media en %

- **Factor C (Cobertura vegetal):** Se determinó dependiendo del tipo de cobertura vegetal y del porcentaje de cobertura, asignando un valor de tablas correspondiente. (Anexo: Cuadros 13-16).
- **Factor P (Prácticas de conservación):** Se determinó en cada polígono de acuerdo a los índices del factor P (Anexo: Cuadro 15). Se asignó un valor de 1.0, donde no se realizan prácticas de conservación.

4.2.4 Zonificación para la restauración hidrológico-forestal

Con el condicionamiento de los índices de escurrimiento medio (Q , mm), escurrimiento máximo instantáneo (Qp , m³/seg) y aportación de sedimentos a una sección del cauce (Y , ton/ha/año), se procedió a realizar la zonificación de las áreas prioritarias y homogéneas para la restauración hidrológico-forestal y áreas susceptibles para captación de agua de lluvia en la base de datos de los mapas vectoriales de uso de suelo y vegetación de cada microcuenca.

Áreas prioritarias: Para delimitar las áreas prioritarias para la restauración hidrológico-forestal, se condicionaron los indicadores mínimos y medios de los escurrimientos superficiales (Q y Qp) y la pérdida de suelos (Y), contenidos en la base de datos de los mapas vectoriales correspondiente a cada microcuenca.

- a) **Áreas para aplicación de biotecnias:** Con las bases de datos del mapa vectorial de (Qp) y la base de datos del mapa de (Y), se condicionaron los índices para determinar las áreas que presentan de menor a medio escurrimiento superficial y de mínima a media pérdida de suelo.
- b) **Áreas para aplicación de prácticas mecánicas:** De la misma manera se condicionaron los índices (Qp) moderado y moderadamente alto y (Y) en su valor medio y alto.

Áreas para la aplicación de biotecnias y prácticas mecánicas: Para la zonificación de estas áreas, en la base de datos del mapa vectorial de uso de suelo y vegetación, se condicionaron los indicadores (Y) Alto y Muy alto y (Qp) bajo.

Áreas para aplicación de hidrotecnias: Se condicionaron las variables (Y) y (Qp), para especificar aquellas áreas que presentan escurrimientos de moderado a moderadamente alto y mayores índices de pérdidas de suelo por erosión hídrica.

Áreas para la implementación de biotecnias, prácticas mecánicas e hidrotecnias: En la zonificación se condicionaron los índices alto y muy alto de (Y) e índice moderadamente alto de (Qp) en la base de datos de los mapas vectoriales de uso de suelo y vegetación de cada microcuenca.

Áreas para captación de agua de lluvia: Con las bases de datos del mapa vectorial de Tipo de suelo, se condicionaron aquellas áreas que presentan suelos de textura media, Escurrimiento superficial (Q) moderado y moderadamente alto; así como el menor índice de aportación de sedimentos (Y).

5 RESULTADOS

5.1 Microcuenca Río Milpa Alta

5.1.1 Variables hidrológicas

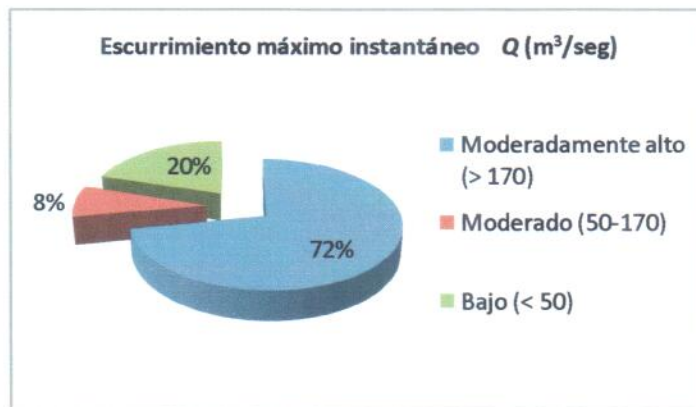
La Microcuenca Río Milpa Alta presenta un área de 6223.47 ha, se clasifica como una cuenca Muy chica (SEMARNAT, 2000), con la presencia de escurrimientos de tipo efímero (SAGARPA, GDF, FIRCO y CORENADER, 2004), presenta una pendiente media del 9% y una diferencia de nivel de 1200 m. (Tabla 1).

Tabla 1. Características geomorfométricas, Microcuenca Río Milpa Alta

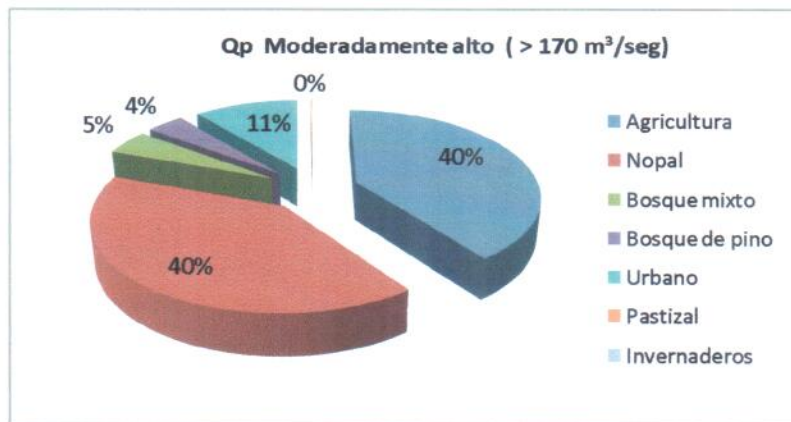
Características	Indicador
Área de la microcuenca	6223.47 ha
Perímetro	34895.72 m
Longitud	12685.63 m
Área de drenaje	6223.548 ha
Longitud del cauce principal	15759.32 m
Pendiente media	9.4 %
Elevación media	2758.76 m

Para verificar el estado de conservación de los recursos suelo, agua y vegetación de la Microcuenca Río Milpa Alta, se evaluaron las variables hidrológicas: Escurrimiento medio (Q , mm) y escurrimiento máximo instantáneo (Q_p , m³/seg), correspondientes al período de lluvia. (Cartas 1-4), (Tablas 3-5).

Los escurrimientos superficiales indican que en la Microcuenca Río Milpa Alta, el 72% de la superficie presenta un Escorrimento máximo instantáneo (Q_p , m^3/seg) Moderadamente alto (Gráfica 1), contribuyendo a los mayores índices las áreas agrícolas y cultivo de nopal (Gráfica 2).



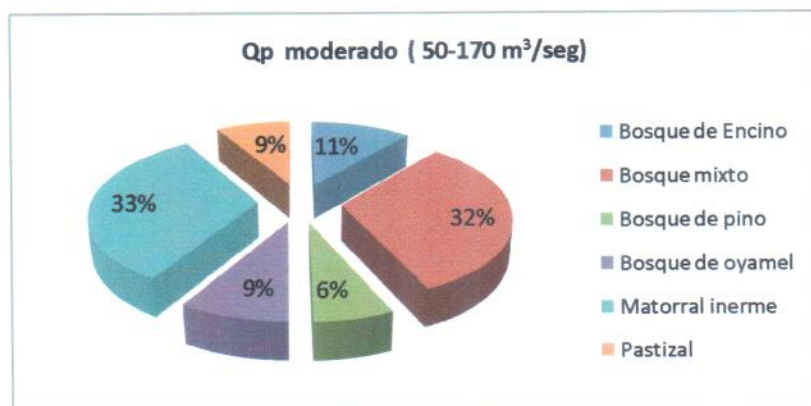
Gráfica 1. Escorrimento máximo instantáneo por área, Microcuenca Río Milpa Alta



Gráfica 2. Escorrimento máximo instantáneo (Moderadamente alto), por tipo de cobertura. Microcuenca Río Milpa Alta.

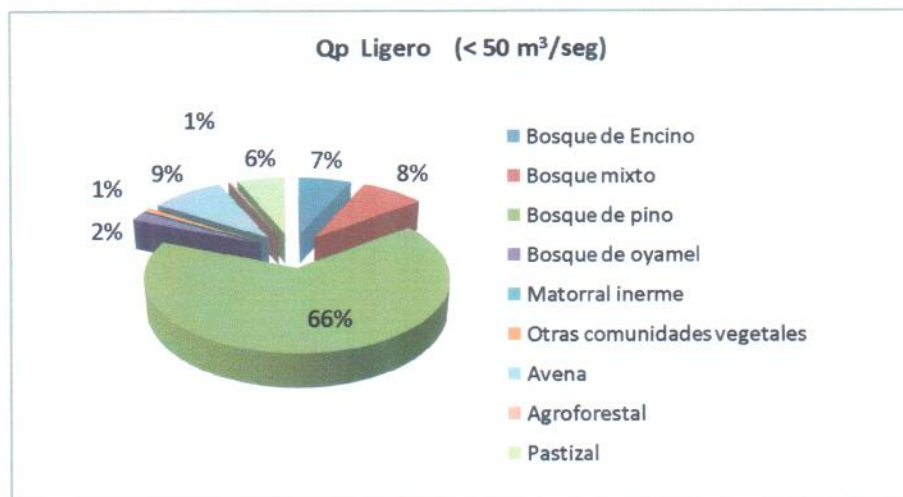
Las zonas que presentan un (Q_p) moderado, son áreas de bosque fragmentadas que presentan una cobertura vegetal media (50-75%) y sujetas a

sobrepastoreo: Bosque mixto (Pino-Aile), Matorral inerme y bosque de encino (Gráfica 3).



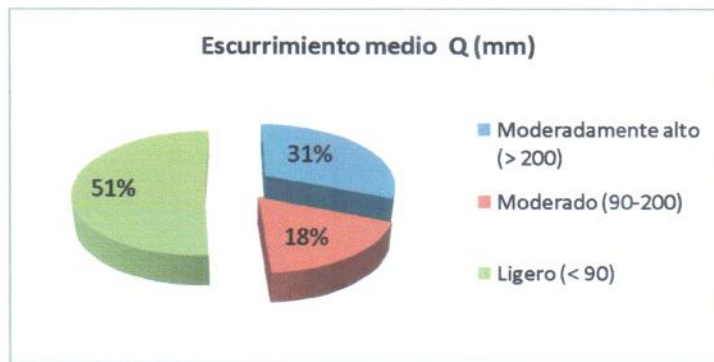
Gráfica 3. Ecurrimiento máximo instantáneo (Moderado) por tipo de cobertura. Microcuenca Río Milpa Alta.

Las áreas con menor (Q_p), presentan una cobertura mayor al 75%. Las áreas que contribuyen con el mayor porcentaje corresponden al Bosque de pino (Gráfica 4), estas áreas son consideradas como prioritarias para iniciar el proceso de restauración hidrológico-forestal.

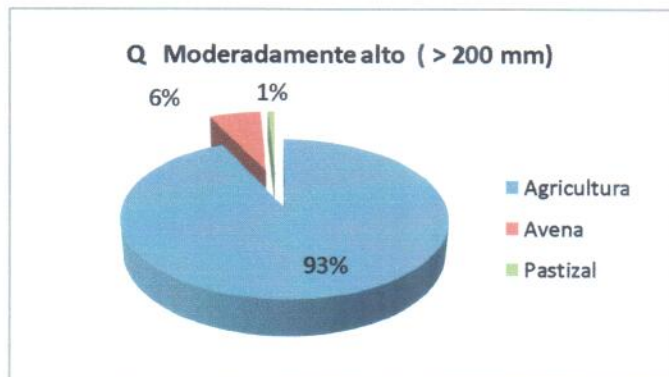


Gráfica 4. Ecurrimiento máximo instantáneo (Ligero) por tipo de cobertura vegetal. Microcuenca Río Milpa Alta.

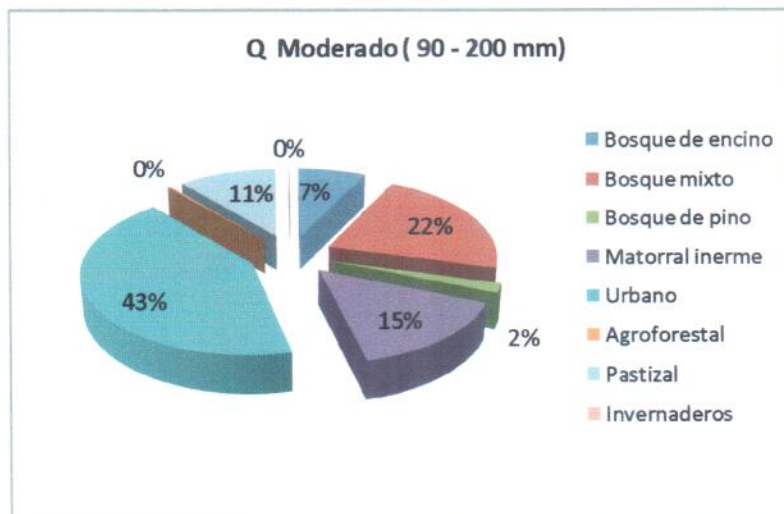
En la determinación de áreas susceptibles para captación de agua de lluvia, se calculó el E scorrimiento superficial medio (Q) y las áreas con baja pérdida de sedimentos (Y). En la Microcuenca Río Milpa Alta el 31% de la superficie presenta un (Q) moderadamente alto y el 18% moderado (Gráfica 5), las áreas delimitadas corresponden a las zonas agrícolas 93% (Q, Moderadamente alto) (Gráfica 6) y para (Q, moderado) las áreas delimitadas corresponden al uso urbano, matorral inerme, bosque mixto y pastizal (Gráfica 7), (Carta 13).



Gráfica 5. E scorrimiento superficial medio por área. Microcuenca Río Milpa Alta



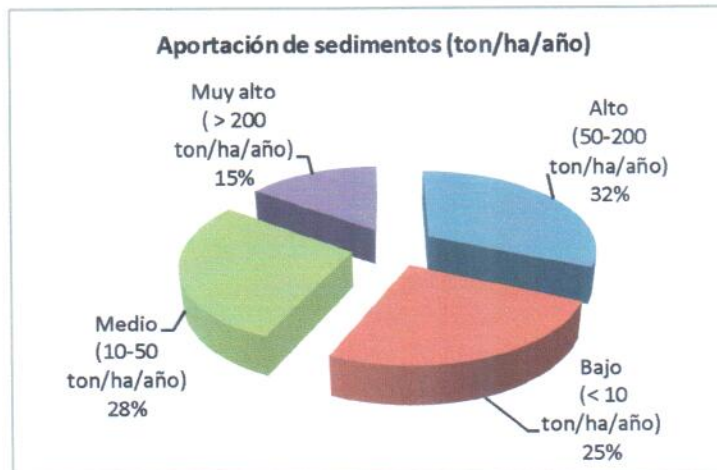
Gráfica 6. E scorrimiento superficial (Moderadamente alto) por tipo de cobertura vegetal. Microcuenca Río Milpa Alta.



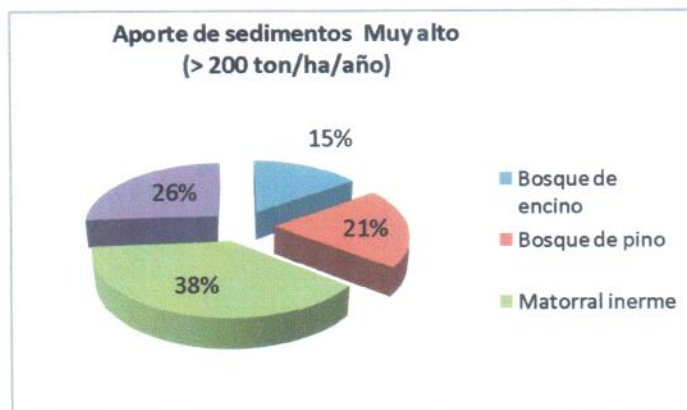
Gráfica 7. Escurrimiento superficial (Moderado) por tipo de cobertura vegetal. Microcuenca Río Milpa Alta.

5.1.2 Sedimentos aportados

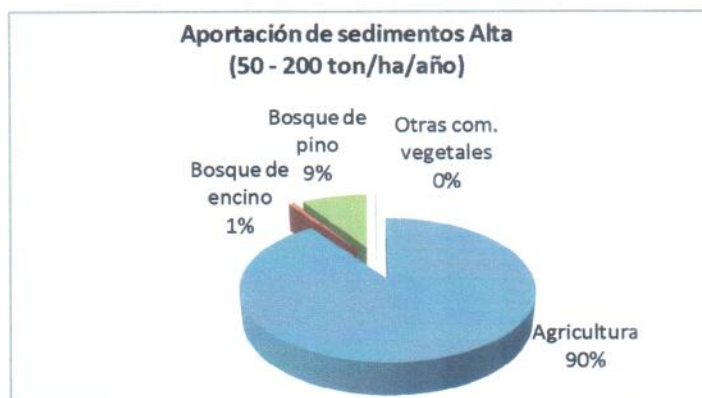
Los resultados indican que el 15% del área de la Microcuenca Río Milpa Alta presenta una aportación de sedimentos Muy alta, (>200 ton/ha/año) (Gráfica 8), contribuyendo a los mayores porcentajes de pérdida de suelo: Matorral inerme con 38%, Agricultura (avena) 26%, Bosque de pino 21% y bosque de encino con el 15% (Gráfica 9), estas áreas presentan una cobertura vegetal menor al 50%. Así mismo, el 32% del área de la microcuenca presenta una alta pérdida de suelos de 50 a 200 ton/ha/año, en donde el área de uso agrícola representa el mayor porcentaje (90%) (Gráfica 10); indicando una cobertura vegetal media (50-75%), asociada a la falta de prácticas de conservación (Tabla 3-5), (Anexo Carta 5).



Gráfica 8. Aportación de sedimentos por área. Microcuenca Río Milpa Alta.

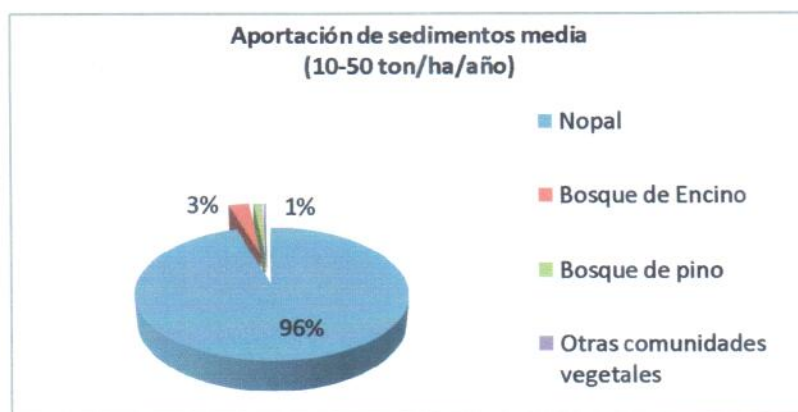


Gráfica 9. Aportación de sedimentos (Muy alto). Microcuenca Río Milpa Alta.



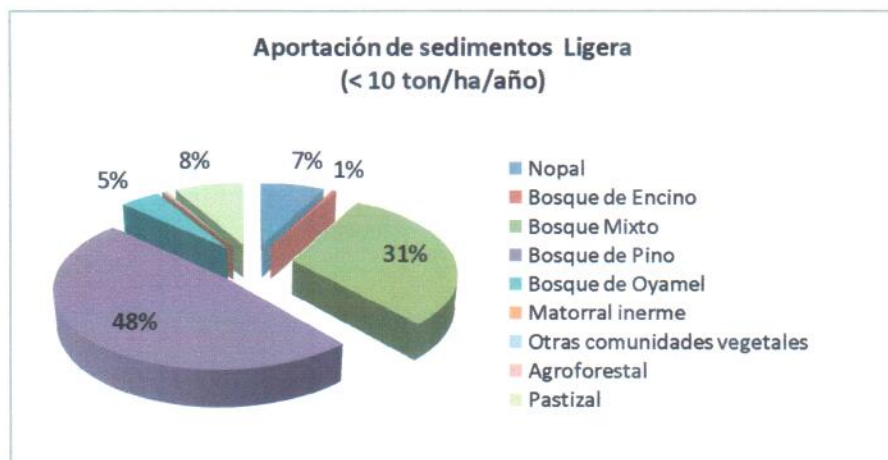
Gráfica 10. Aportación de sedimentos (Alto). Microcuenca Río Milpa Alta.

Las áreas que presentan aportación de sedimentos moderada representan el 28% del área de la microcuenca, correspondiendo el mayor porcentaje (96%) a las áreas de cultivo de nopal (Gráfica 11).



Gráfica 11. Aportación de sedimentos (Media). Microcuenca Río Milpa Alta.

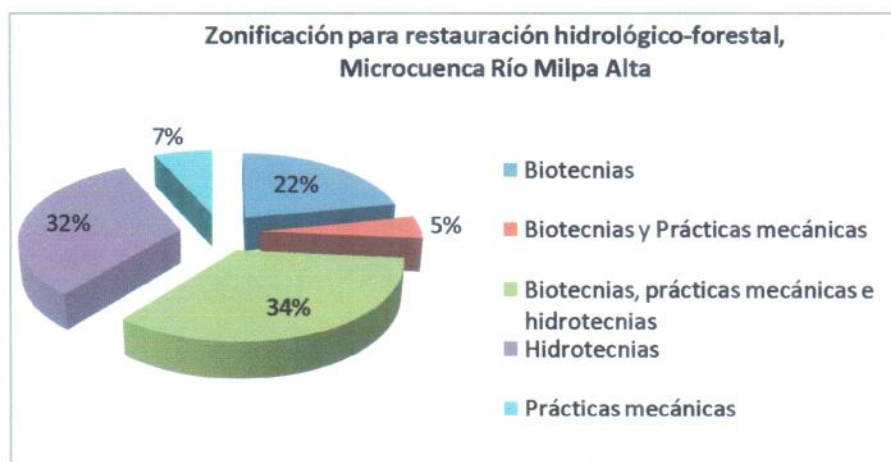
En la Microcuenca Río Milpa Alta sólo el 25% de la superficie presenta una ligera aportación de sedimentos (< 10 ton/ha/año) (Gráfica 8), contribuyendo al mayor porcentaje las áreas de Bosque de pino y Bosque mixto (Pino-Aile) (Gráfica 12), representando las áreas prioritarias para la restauración-hidrológico-forestal.



Gráfica 12. Aportación de sedimentos (Ligera). Microcuenca Río Milpa Alta.

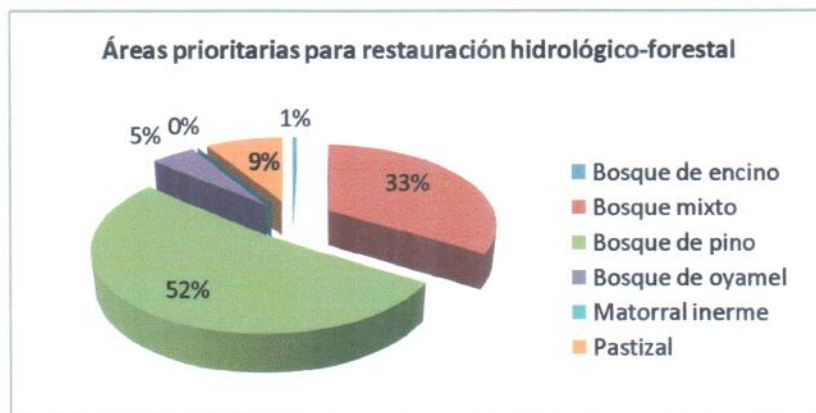
5.1.3 Zonificación para la restauración hidrológico-forestal

En la zonificación para la restauración hidrológico-forestal en la Microcuenca Río Milpa Alta, los resultados indican que el 34% de la superficie requiere el desarrollo de prácticas vegetativas, mecánicas e hidrotecnias; el 32% de la construcción de obras de control de azolves temporales y permanentes y el 22% para el establecimiento de biotecnias (Gráfica 13) (Anexo: Carta 7).



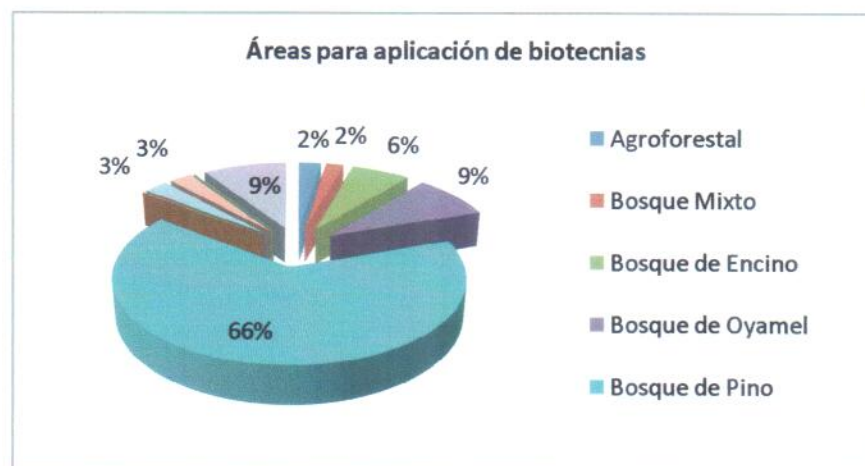
Gráfica 13. Zonificación de áreas para restauración hidrológico-forestal. Microcuenca Río Milpa Alta

- a) **Áreas prioritarias:** El proceso de restauración de una cuenca hidrográfica deberá iniciar en las partes altas, zona donde se ubica la mayor parte de las áreas prioritarias y en las que se originan los escurrimientos superficiales. Los resultados indican que los mayores porcentajes de las áreas delimitadas como prioritarias corresponde al Bosque de pino con un 52% y Bosque mixto (Pino-Aile) con 33% (Gráfica 14) (Anexo: Carta No. 6).



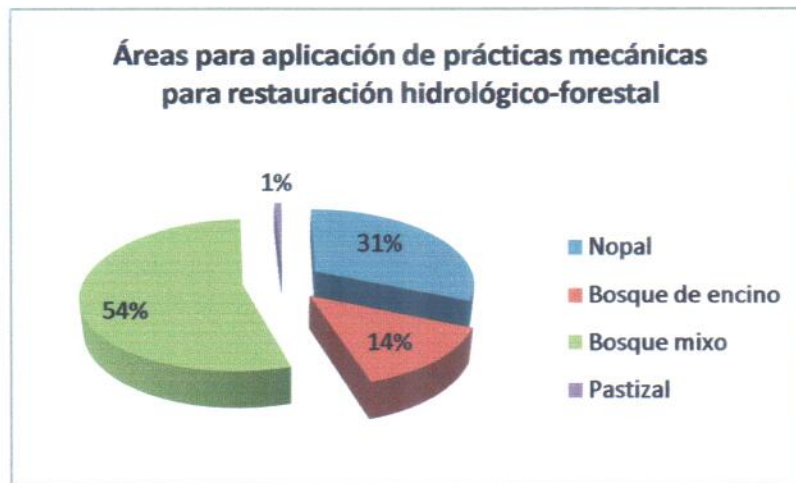
Gráfica 14. Áreas prioritarias. Microcuenca Río Milpa Alta.

b) Áreas para aplicación de biotecnias: Se delimitaron las áreas que están dentro del rango de áreas prioritarias por considerar la factibilidad para implementar actividades para la recuperación de la cubierta vegetal que permita proteger el suelo contra el efecto del impacto de la lluvia, aumentar la resistencia de éste contra la erosión y aumentar la infiltración. Corresponde el mayor porcentaje al bosque de pino (66%); (Gráfica 15) (Anexo: Carta 8)



Gráfica 15. Áreas para aplicación de biotecnias. Microcuenca Río Milpa Alta.

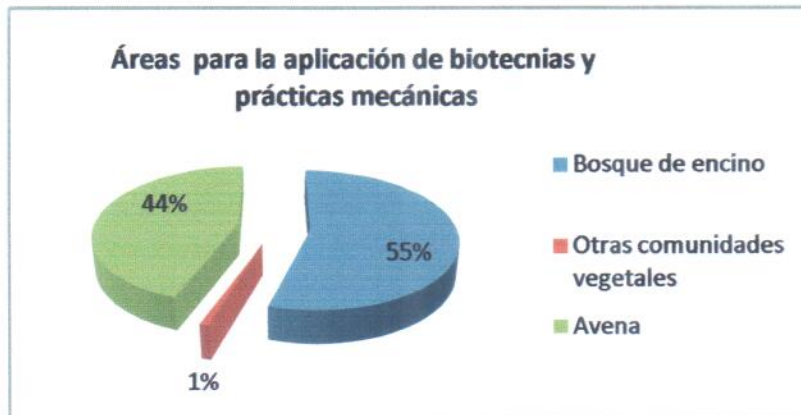
c) Áreas para el desarrollo de prácticas mecánicas: La delimitación de las áreas para la aplicación de prácticas mecánicas se hizo considerando los índices de (Y) medio y alto y (Qp) moderado y moderadamente alto en donde el mayor porcentaje (54%) corresponde al bosque mixto (Gráfica 16); (Anexo: Carta No. 9).



Gráfica 16. Áreas para aplicación de prácticas mecánicas. Microcuenca Río Milpa Alta.

d) Áreas para aplicación de biotecnias y prácticas mecánicas

En la zonificación para aplicación de biotecnias y prácticas mecánicas se condicionaron los indicadores (Y) Alto y Muy alto y (Qp) moderado y moderadamente alto. Los mayores porcentajes corresponden al bosque de encino (55 %) y 44% al área de cultivo de avena (Gráfica 17); estas áreas presentan escasa cobertura vegetal debido a que están sujetas a pastoreo intensivo (Carta No. 10).



Gráfica 17. Áreas para aplicación de biotecnias y prácticas mecánicas. Microcuenca Río Milpa Alta.

e) Áreas para implementación de hidrotecnias

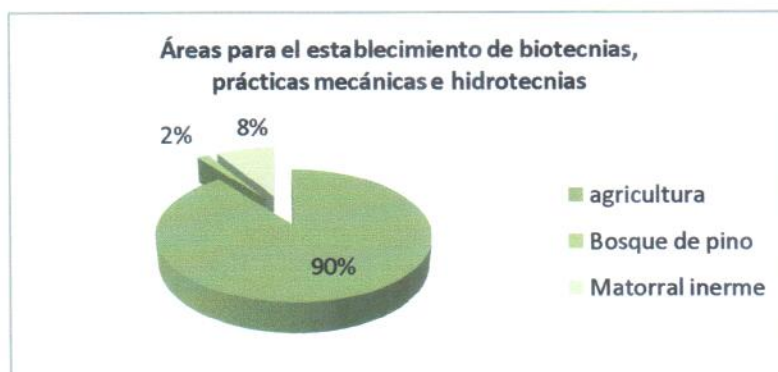
La zonificación para la implementación de hidrotecnias se realizó en las unidades que presentaron índices alto-muy alto de (Y) y moderado-moderadamente alto (Qp). El 91% corresponde a las áreas de cultivo de nopal (Gráfica 18). En estas áreas la pérdida de cubierta vegetal y la velocidad de los escurrimientos generan la formación de cárcavas, reducción del área útil del cultivo y el azolve de suelos fértiles con material de arrastre (Carta 11).



Gráfica 18. Áreas para implementación de hidrotecnias. Microcuenca Río Milpa Alta.

f) Áreas para el desarrollo de biotecnias, prácticas mecánicas e hidrotecnias

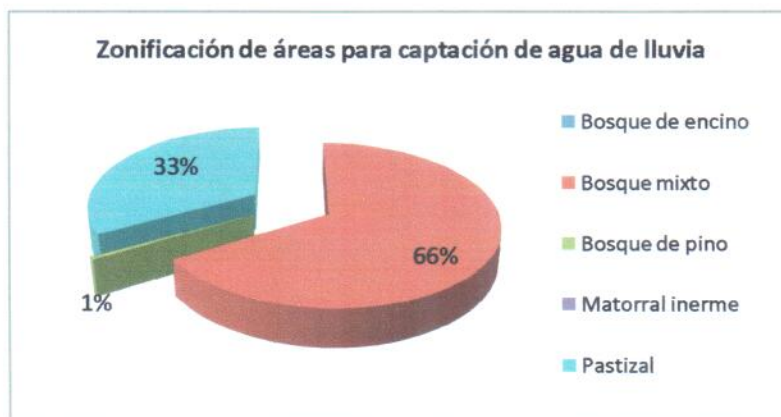
En la zonificación para el desarrollo de biotecnias, prácticas mecánicas e hidrotecnias, se incluyeron los índices alto y muy alto de (Y) y (Qp). El mayor porcentaje corresponde al área agrícola (Gráfica 19); áreas que presentan suelos sin estructura y mayor índice de pérdida de suelo fértil por erosión hídrica (Anexo: Carta No. 12).



Gráfica 19. Áreas para la aplicación de biotecnias, prácticas mecánicas e hidrotecnias. Microcuenca Río Milpa Alta.

g) Áreas para el establecimiento de obras para captación de agua de lluvia

Para la delimitación de áreas para la captación de agua de lluvia se consideró el indicador moderado y moderadamente alto de (Q), el menor índice de (Y) y suelos con textura media. Las áreas delimitadas corresponden al bosque mixto con 66% y pastizal 33% (Gráfica 20) (Anexo: Carta No. 13).



Gráfica 20. Zonificación de áreas para captación de agua de lluvia. Microcuenca Río Milpa Alta

5.2 Microcuenca Río Cilcuayo

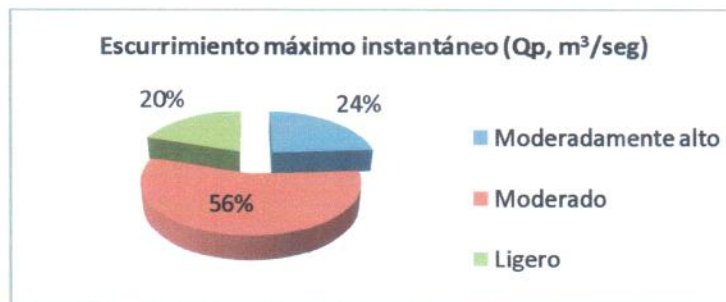
5.2.1 Variables hidrológicas

La Microcuenca Río Cilcuayo, presenta un área de 6036 has, se clasifica como una cuenca Muy chica (SEMARNAT, 2000), con la presencia de escurrimientos de tipo efímero (SAGARPA, GDF, FIRCO y CORENADER, 2004); (Tabla 2).

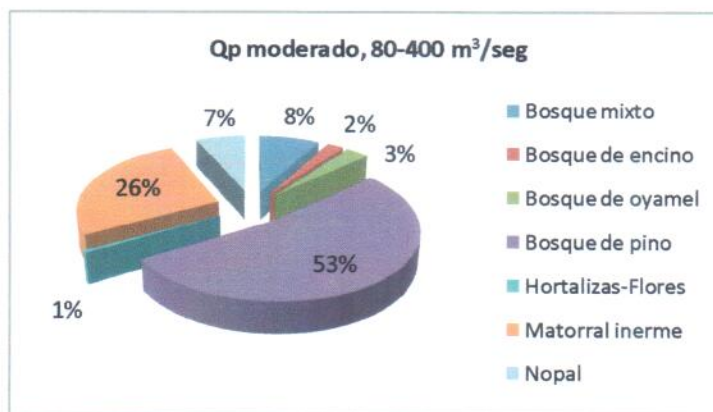
Tabla 2. Características geomorfométricas, Microcuenca Río Cilcuayo

Características	Indicador
Área de la microcuenca	6036 has
Perímetro	39871.395 m
Longitud	11969.73 m
Área de drenaje	4028.65 ha
Longitud del cauce principal	15137.48 m
Pendiente media	14.5 % (MED)
Elevación media	2980.86 msnm

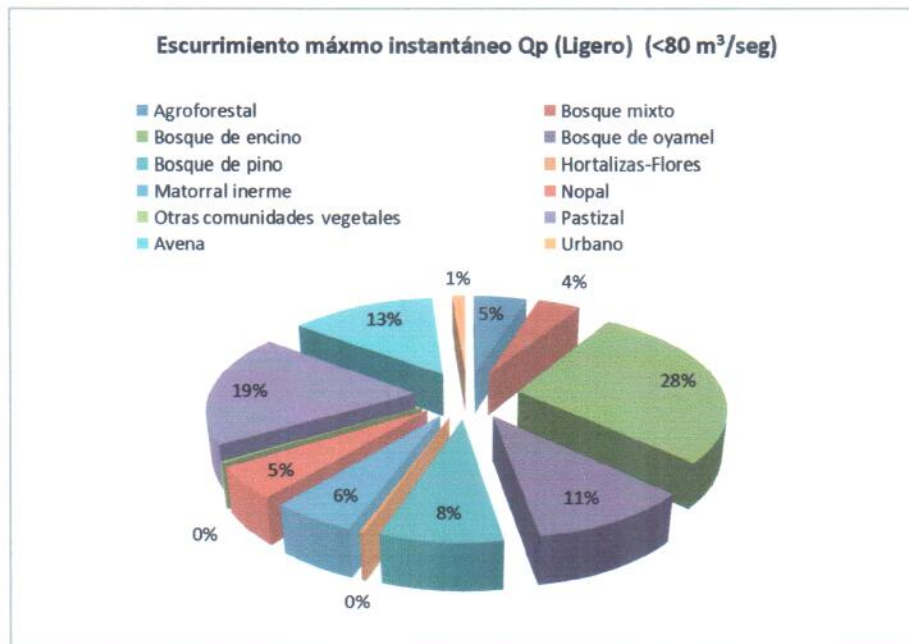
Los resultados indican que el 24% de la superficie de la Microcuenca Río Cilcuayo, presenta un Esgurrimiento máximo instantáneo (Q_p , m^3/seg) Moderadamente alto (Gráfica 21), correspondiendo a las áreas agrícolas. El (Q_p) moderado representa el 56% de la superficie (Gráfica 21) se ubica en el bosque de pino con 53.15 % y Matorral inerme con 24.49% de superficie (Gráfica 22), son áreas que presentan una cubierta vegetal media (50-75%). Así también, el 20% de la superficie presenta (Q_p) ligero (Gráfica 21), polígonos que presentan una cubierta vegetal buena (> 75%), corresponden al Bosque de encino, oyamel, pastizal y áreas de cultivo de avena (Gráfica 23), (Tablas 6-8), (Cartas 14-17).



Gráfica 21. Esgurrimiento máximo instantáneo por área. Microcuenca Río Cilcuayo.

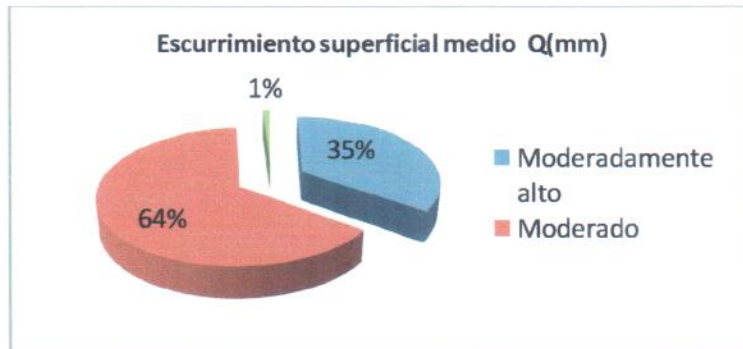


Gráfica 22. Esgurrimiento máximo instantáneo (Moderado) por tipo de cobertura vegetal. Microcuenca Río Cilcuayo.

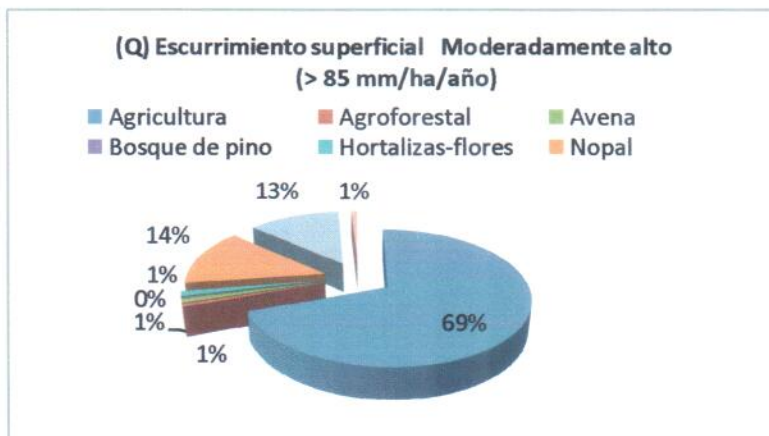


Gráfica 23. Escurrecimiento máximo instantáneo (Ligero), por tipo de cobertura. Microcuenca Río Cilcuayo.

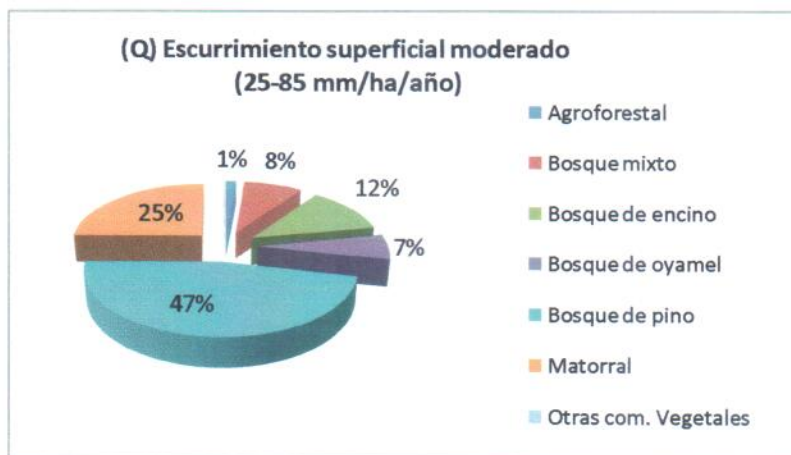
Para especificar las áreas susceptibles para captación de agua de lluvia, se delimitaron aquellas zonas que presentan índices de moderado a moderadamente alto Escurrecimiento medio (Q, mm), menor índice de (Y, ton/ha/año) y suelos de textura media. La Microcuenca Río Cilcuayo presenta un 35% de la superficie con (Q) moderadamente alto (Gráfica 24), correspondiendo a las áreas agrícolas de cultivo de nopal y agroforestal (Gráfica 25) y 64% con (Q) moderado (Gráfica 24), corresponde a las áreas de bosque de pino, bosque de oyamel, bosque de encino, bosque mixto y matorral (Gráfica 26), (Carta No. 26).



Gráfica 24. Escorrentimiento superficial medio por área. Microcuenca Río Cilcuayo.



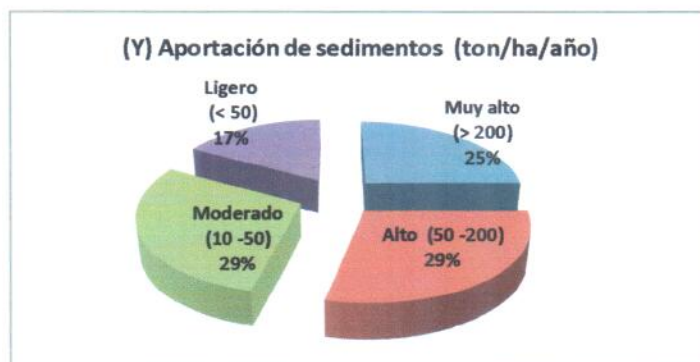
Gráfica 25. Escorrentimiento superficial (Moderadamente alto), por tipo de cobertura vegetal. Microcuenca Río Cilcuayo.



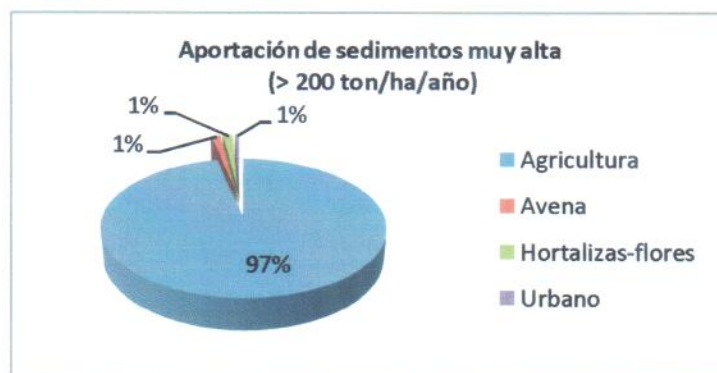
Gráfica 26. Escorrentimiento superficial (Moderado), por tipo de cobertura vegetal. Microcuenca Río Cilcuayo.

5.2.2 Sedimentos aportados

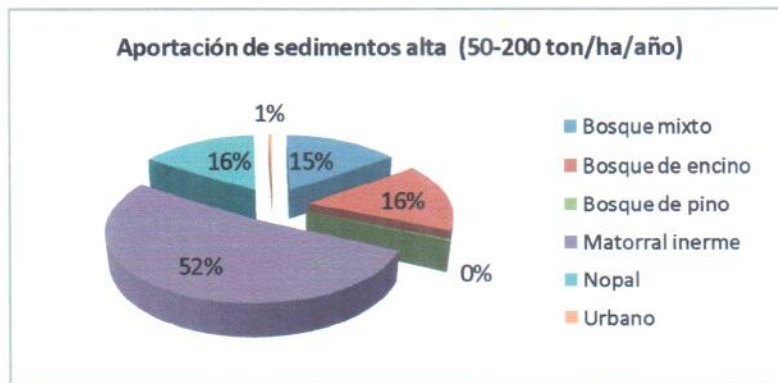
Los Sedimentos aportados a una sección del cauce (Y, ton/ha/año) (Tablas 6-8), indican que el 25% de la superficie de la Microcuenca Río Cilcuayo, presenta una (Y) muy alta (> 200 ton/ha/año), ocupando el 97% las áreas agrícolas (Gráfica 28) y el 29% con una pérdida de suelos alta (50-200 ton/ha/año) (Gráfica 27), corresponden a los mayores porcentajes la agricultura (Gráfica 29), áreas con escasa cobertura vegetal ($< 50\%$), Matorral, Bosque mixto (Pino-Aile), Bosque de encino y áreas de cultivo de nopal (Carta 18).



Gráfica 27. Aportación de sedimentos por área. Microcuenca Río Cilcuayo.

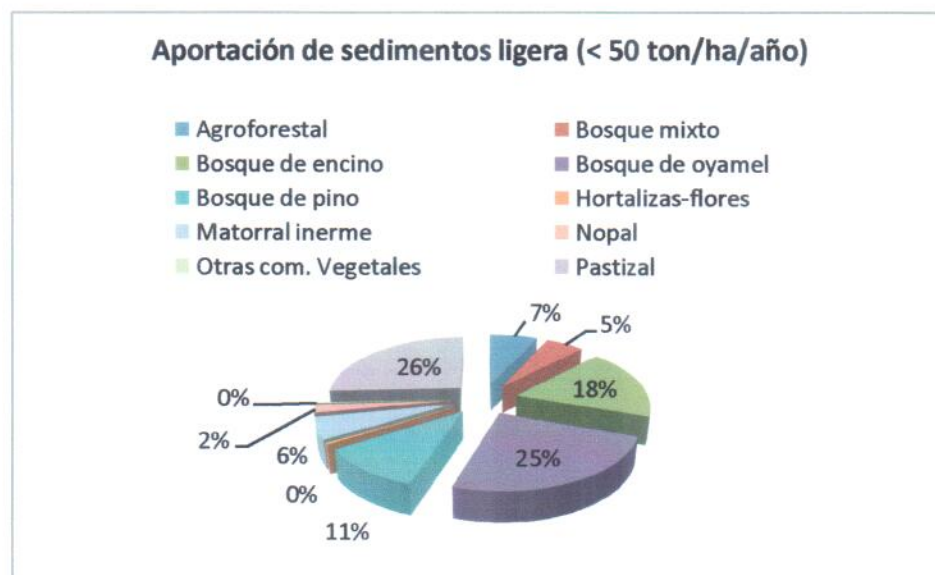


Gráfica 28. Aportación de sedimentos (Muy alta). Microcuenca Río Cilcuayo.



Gráfica 29. Aportación de sedimentos (Alta). Microcuenca Río Cilcuayo.

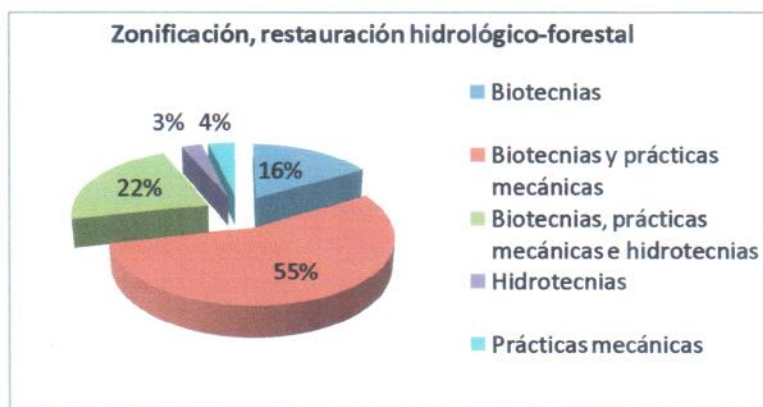
Las áreas que presentan una aportación de sedimentos moderado (Gráfica 27) con 29% de la superficie, corresponden al área de Bosque de pino con 1404.76 has. La aportación de sedimentos ligera, corresponde al Bosque de Oyamel con 25% de la superficie de la microcuenca, Pastizal 26%, Bosque de encino 18% y 11% para matorral inerme (Gráfica 30), polígonos que presentan una cobertura vegetal mayor al 75%.



Gráfica 30. Aportación de sedimentos (Ligera). Microcuenca Río Cilcuayo.

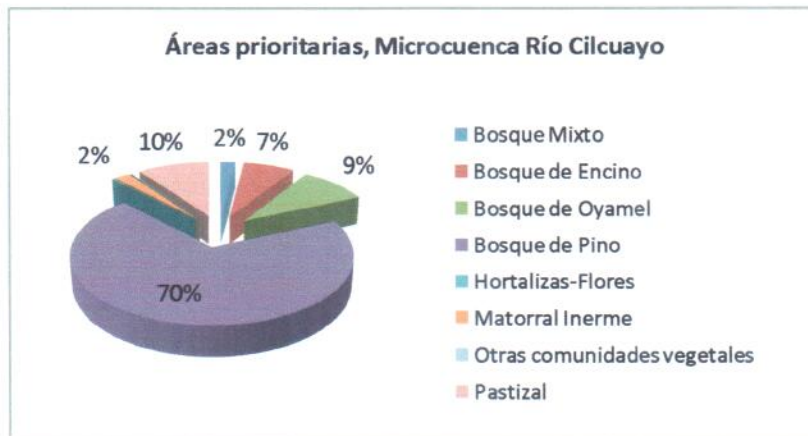
5.2.3 Zonificación para la restauración hidrológico-forestal

Los resultados indican que el 55% de la superficie de la microcuenca requiere de la implementación de biotecnias y prácticas mecánicas y el 22% de prácticas vegetativas, mecánicas e hidrotecnias (Gráfica 31), (Anexo: Carta 20).



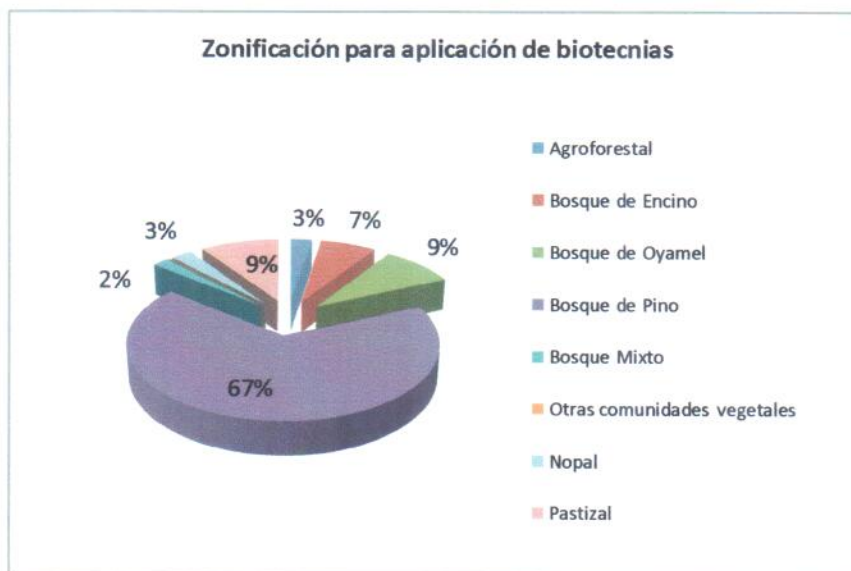
Gráfica 31. Zonificación de áreas para restauración hidrológico-forestal. Microcuenca Río Cilcuayo.

- a) **Áreas prioritarias:** Los resultados indican que el Bosque de pino representa el 70% de la superficie de áreas prioritarias (Gráfica 32) (Anexo: Carta 19); son áreas ubicadas en la parte alta de la microcuenca que presentan una cobertura vegetal de regular a buena (50-75%), en donde se propone iniciar las técnicas de restauración hidrológico-forestal, con el propósito de proteger y restaurar la cubierta vegetal para reducir el proceso erosivo de los escurrimientos superficiales y aumentar la recarga de mantos freáticos.



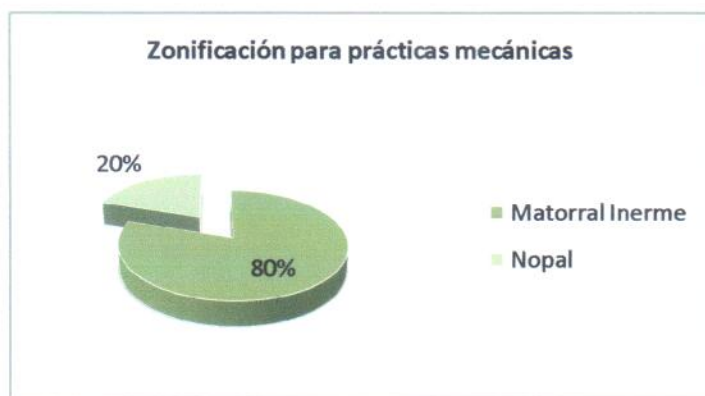
Gráfica 32. Áreas prioritarias, Microcuenca Río Cilcuayo.

b) Áreas para aplicación de biotecnias: Se delimitaron aquellas áreas que están dentro del rango de áreas prioritarias donde se propone la implementación de técnicas para la recuperación de la cubierta vegetal por siembra o plantación de especies nativas; correspondiendo el mayor porcentaje al bosque de pino (67%); (Gráfica 33) (Anexo: Carta 21).



Gráfica 33. Áreas para aplicación de biotecnias. Microcuenca Río Cilcuayo.

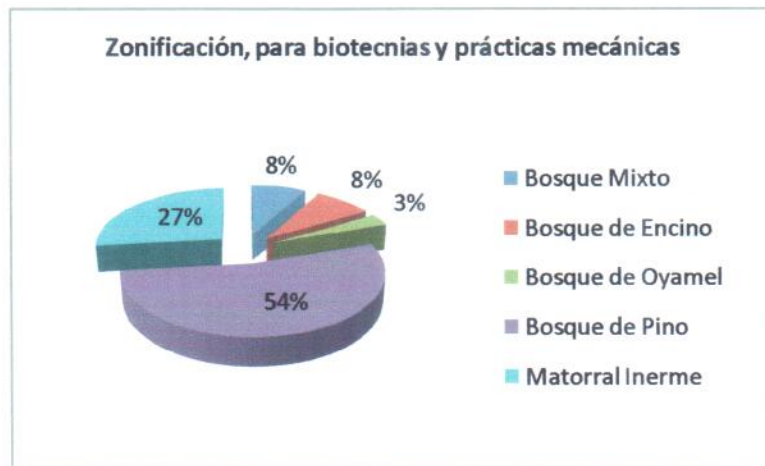
c) Áreas para el desarrollo de prácticas mecánicas: La delimitación de las áreas para la aplicación de prácticas mecánicas indican que el mayor porcentaje (80%) corresponde al área de Matorral inerme y el 20% al área de cultivo de nopal (Gráfica 34); (Anexo: Carta 22). Son áreas que presentan una cobertura vegetal regular (50-75%), pérdida de suelo fértil por erosión hídrica y bajo índice de infiltración.



Gráfica 34. Áreas para implementación de prácticas mecánicas. Microcuenca Río Cilcuayo.

d) Áreas para aplicación de biotecnias y prácticas mecánicas

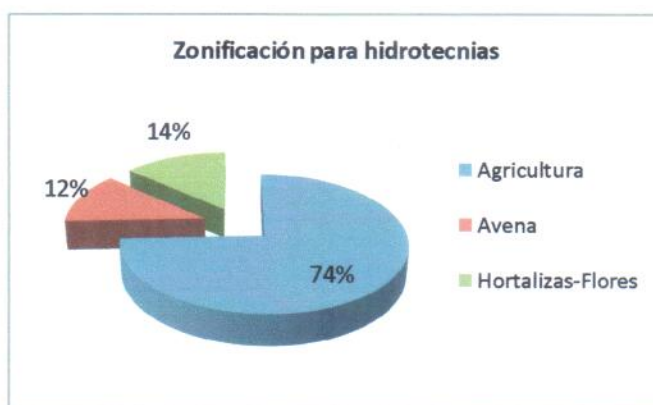
La zonificación para aplicación de biotecnias y prácticas mecánicas muestran que el 54% de la superficie corresponde al bosque de pino, el 27 % al matorral inerme y 8% al bosque de encino y bosque mixto (Gráfica 35); en general, estas áreas se encuentran fragmentadas, presentan una cubierta vegetal de regular a mala y sujetas a pastoreo intensivo (Anexo: Carta 23).



Gráfica 35. Áreas para la implementación de biotecnias y prácticas mecánicas. Microcuenca Río Cilcuayo.

e) Áreas para implementación de hidrotecnias

Para la implementación de hidrotecnias se tiene que el 74% de la zonificación corresponde a las áreas agrícolas, el 14% al área de hortalizas-flores y el 12% al área de cultivo de avena (Gráfica 36), (Anexo: Carta 24).



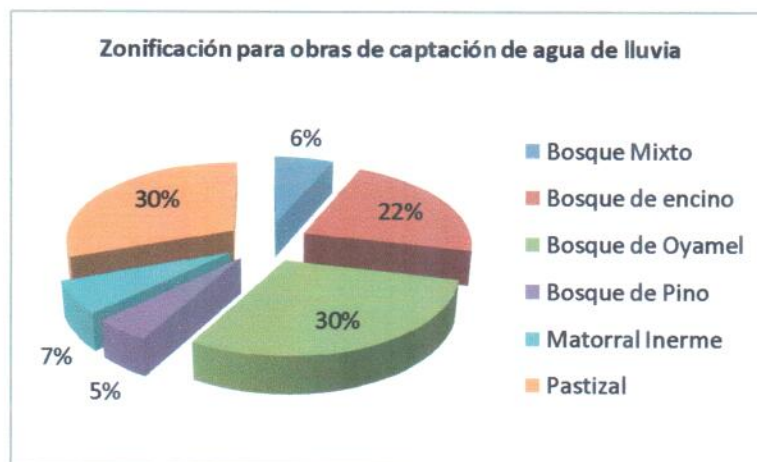
Gráfica 36. Áreas para aplicación de hidrotecnias. Microcuenca Río Cilcuayo.

f) Áreas para el desarrollo de biotecnias, prácticas mecánicas e hidrotecnias

En la zonificación para el desarrollo de biotecnias, prácticas mecánicas e hidrotecnias, se incluyeron los índices alto y muy alto de (Y) y (Qp), el 100 % con 1050 has., corresponde al área agrícola; áreas que presentan suelos sin estructura, pérdida de suelo fértil y cobertura vegetal mala, menor al 50% (Anexo: Carta No. 25).

g) Áreas para el establecimiento de obras para captación de agua de lluvia

Considerando el indicador moderado y moderadamente alto (Q), el índice menor (Y) y suelos con textura media se delimitaron las áreas para realizar técnicas de captación de agua de lluvia que corresponden al bosque de oyamel 30%, pastizal 30% y bosque de encino 22% (Gráfica 37) (Anexo: Carta No. 26).



Gráfica 37. Zonificación de áreas para captación de agua de lluvia. Microcuenca Río Cilcuayo.

5.3 Propuestas de restauración hidrológico-forestal para las Microcuencas Río Milpa Alta y Río Cilcuayo, Delegación Milpa Alta, Distrito Federal.

Los factores de importancia para la planeación de un proyecto de restauración hidrológico-forestal en una cuenca son los escurrimientos superficiales y la pérdida de suelo, éste último el principal indicador del deterioro de los componentes del ecosistema como la cobertura vegetal y la degradación física y biológica del suelo.

En virtud de que las Microcuencas Río Milpa Alta y Río Cilcuayo, se localizan dentro de un área bioclimática similar, presentan continuidad en los tipos de suelo, vegetación e índices de pérdida de suelo de alta a muy alta (> 50 ton/ha/año) entre un 50% de la superficie; se optó por plantear la propuesta de restauración hidrológico-forestal para ambas microcuencas.

El planteamiento de las propuestas, se realizó a través de la zonificación de áreas para la restauración hidrológico-forestal; en primer lugar las áreas prioritarias, considerando que éstas presentan mejores características físicas de suelo y agua para la implementación de biotecnias a través de la siembra y revegetación con especies nativas y en segundo término aquellas áreas con características hidrológicas y de pérdida de suelo homogéneas, donde se pueden combinar biotecnias, prácticas agronómicas y mecánicas, hidrotecnias y técnicas para la construcción de obras para captación de agua de lluvia.

1. Biotecnias

La propuesta de biotecnias para la Microcuenca Río Milpa Alta y Microcuenca Río Cilcuayo, se realizó con la zonificación de áreas prioritarias para la recuperación de la cubierta vegetal. La implementación de biotecnias se propone a través de la siembra o plantación de especies arbóreas, arbustivas y herbáceas preferentemente nativas, con el propósito de establecer parches de vegetación en áreas donde no existe cubierta vegetal, derivados de prácticas inadecuadas de cultivo, aprovechamientos intensivos de recursos vegetales, pastoreo intensivo o uso asignado.

El objetivo de la propuesta para la implementación de biotecnias es reducir los índices de pérdida de suelo por erosión hídrica, interrumpir los procesos de escorrentía erosivos y restaurar terrenos desprovistos de vegetación con vocación forestal, preservando la composición y estructura de la cubierta vegetal de las áreas a restaurar. Así también, mejorar la estructura del suelo, reducir la pérdida de humedad por evaporación, aumentar los índices de retención de humedad e infiltración, mejorar la fertilidad por aporte de materia orgánica y fijación de nitrógeno, mejorar la disponibilidad de nutrimentos evitando su lixiviación para lograr la sobrevivencia de las especies plantadas, propiciar las condiciones para hábitat de fauna, conservación de especies, generación de bienes y servicios ambientales.

a) Áreas forestales

- **Revegetación y/o Reforestación:** Repoblación forestal con fines de restauración de los ecosistemas y aumento de la biodiversidad. Se propone a través de siembras o plantación de especies nativas o adaptadas al tipo de clima del área de estudio, tendientes a recuperar la masa forestal en los estratos arbóreo, arbustivo y herbáceo.

Especies arbóreas: *Abies religiosa* (Abies, abeto), *Pinus hartwegii* (Pino ocote), *Pinus teocote*, *Pinus pseudostrobus*, *Pinus montezumae*, *Quercus rugosa* (Encino ancho), *Quercus laurina* (Encinillo), *Cupressus lusitanica* (Cedro blanco). En áreas ribereñas: *Alnus firmifolia* (Aile), *Salix oxylepis* (Ahuejote), *Salix babylonica* (Sauce llorón), *Ulmus americana* (Olmo), *Fraxinus uhdei* (Fresno). En matorral: *Prosopis laevigata* (Mezquite), *Acacia farnesiana* (Huizache), *Grevillea robusta* (Grevillea), *Schinus molle* (Pirul), *Tamarix articulata* (Tamarix).

Especies arbustivas: *Arbutus glandulosa* (Madroño), *Baccharis conferta* (Escobilla), *Clethra mexicana*, *Lupinus montanus* (Lupinus), *Buddleia parviflora* (Xahuilisco). En matorral: *Agave* spp, *Opuntia* spp. y pastizales nativos como *Festuca tolucensis*, *Muhlenbergia quadridentata*, *Muhlenbergia macroura*, *Festuca amplissima*, *Trisetum spicatum* y pastizales de crecimiento moderado a alto: *Brachiaria* spp, (Braquiaria); *Pennisetum ciliae* (Elefante haiper), *Paspalum dilatatum* (Dallis),

Pennisetum purpureum var. *Merkeri* (Merkeroi), *Panicum máximum* (Guinea), *Melinis minutiflorum* (gordura), *Hyparrhenia rufa* (Jaragua), *Bromus* spp (Bromo), *Setaria* spp (Setaria), *Eragrostis curvula* (Pasto llorón).

- **Terrazas de muro vivo:** Construir terraplenes con el fin de favorecer el proceso de infiltración, reducir la velocidad del escurrimiento superficial y disminuir la aportación de sedimentos, plantando barreras con especies arbóreas o arbustivas. Árboles frutales: *Prunus pérsica* (Durazno), *Malus malus* (Manzana), *Prunus salicina* (Ciruela), *Crataegus* spp, (Tejocote), *Prunus serotina* var. *capulí* (Capulín), *Pyrus communis* (Pera), *Ficus carica* (Higuera), *Carya illinoensis* (Nogal) y *Persea americana* (Aguacate). Especies arbustivas: *Opuntia ficus*, *Agave* spp, *Lupinus montanus* (Lupino), *Sesbania macrocarpa* (Sesbania), *Lezpedeza stipulacea*, *Vicia villosa* (Veza), *Trifolium pratense* (Trébol rojo), *Trifolium incarnatum* (Trébol encarnado).

b) Pastizal:

- **Revegetación:** Regeneración inducida de áreas dedicadas al pastoreo por medio de revegetación o siembra directa de especies forrajeras y leguminosas con múltiples propósitos: Forraje, abono verde, cobertura del suelo, control de la erosión y mejorar la estabilidad de los agregados del

suelo. Se sugiere la siembra de especies mencionadas en los puntos anteriores.

- **Fajas al contorno:** Este sistema se propone utilizarlo para la restauración y conservación de suelos, aumentar la infiltración y reducir la velocidad de escorrentía en terrenos con pendiente de 2 a 15%, en fajas alternas y de anchura variable, una de escarda con siembra o plantación de especies temporales o perennes y la otra con cultivos tupidos, siguiendo las curvas de nivel del terreno y en sentido perpendicular a la pendiente.

Los cultivos propuestos en fajas al contorno deben estar sujetos a rotaciones definidas, se sugiere alternar *Zea mays* (Maíz) y leguminosas *Crotalaria anagyroides*, *Lespedeza stipulacea*, *Vicia villosa*, *Melilotus alba*, *Melilotus indica* y *Sesbania macrocarpa*. Cereales como: *Hordeum vulgare* (Cebada), *Triticum aestivum* (trigo), *Avena Sativa* (avena) asociadas con leguminosas y especies perennes como nopal y maguey.

- **Terrazas de muro vivo:** Se propone la construcción de terraplenes con una zanja donde el agua acumulada se infiltre a lo largo de dichas terrazas, con el propósito de reducir la erosión del suelo, aumentar la infiltración, disminuir la velocidad de escurrimiento, reducir el volumen de sedimentos en los cauces y aumentar la sobrevivencia de las especies. En el bordo

plantar especies como *Opuntia ficus indica*, *Agave* spp y especies de leguminosas mencionadas en los puntos anteriores.

- **Cultivos de cobertura:** Práctica cuyo objetivo es formar y establecer una cubierta vegetal en el terreno desprovisto de vegetación para conservarlo y mejorarlo; por lo que para recuperar la cubierta vegetal de estas áreas se propone la siembra y revegetación con especies leguminosas de hábito rastrero o tendido para proporcionar mayor cubrimiento del área en menor tiempo, adicionar materia orgánica al suelo, fijación de nitrógeno, incorporarse al suelo como abono verde, obtención de forraje y el control de los escurrimientos superficiales.

Especies: *Centrocema pubescens*, *Crotalaria anagyroides*, *Desmodium infortunatum*, *Lespedeza stipulacea*, *Melilotus alba*, *Melilotus indica*, *Phaseolus atropurpureus*, *Pueraria phaseoloides*, *Pueraria thumbergiana*, *Sesbania macrocarpa*, *Stizolobium deeringianum*, *Vicia villosa* y pastos adaptados a condiciones de sequía como: *Pennisetum purpureum* var. *Merkeri*, *Melinis minutiflorum*, *Hyparrhenia rufa*, *Phleum pratense*.

- **Surcado lister:** Se sugiere establecer surcos dobles con especies leguminosas separados por una faja de pasto en áreas agrícolas abandonadas y áreas de pastizal que presenten menos del 50% de cobertura vegetal, con el propósito de evitar la erosión del suelo,

enriquecer las áreas de pastizal a través del establecimiento de especies arbustivas y pastizales, aportación de nitrógeno y materia orgánica.

c) Agroforestal

- **Establecimiento de cultivos de cobertera:** Uso de especies leguminosas con múltiples propósitos: Aportación de nitrógeno, forraje verde, pastura, abono verde y control de erosión. Especies: *Melilotus alba* (Trébol dulce), *Medicago sativa* (Alfalfa), *Melilotus indica* (Trébol amarillo), *Lupinus montanus* (Lupino), *Trifolium pratense* (Trébol rojo), *Pueraria phaseoloides* (Kudzú), *Trifolium repens* (Trébol blanco), *Pisum sativum* (Chícharo forrajero), *Lepedeza stipulacea* (Lespedeza) y *Vicia villosa* (Veza).
- **Mejoramiento de los sistemas agroforestales:** Combinar especies arbóreas que pueden ser maderables o frutales, arbustivas y herbáceas, principalmente de usos múltiples y protección del suelo. Especies arbóreas frutales para clima templado: *Prunus pérsica* (Durazno), *Malus malus* (Manzana), *Pyrus communis* (Pera), *Prunus salicina* (Ciruela), *Prunus americana* (chabacano), *Crataegus* spp, (Tejocote), *Prunus serotina* var. *capulí* (Capulín), *Cydonia oblonga* (Membrillo), *Terminalia catappa* (Almendro), *Ficus carica* (Higuera), *Carya illinois* (Nogal), *Gevuina Avellana* (Avellano) y *Persea americana* (Aguacate). Especies arbustivas: *Rubus ulmifolius* (Zarzamora), *Rubus idaeus* (Frambuesa) y *Opuntia ficus*

indica (Nopal verdura). Especies herbáceas: *Vicia villosa* (Veza), *Medicago sativa* (Alfalfa), *Zea mays* (Maíz), *Phaseolus vulgaris* (frijol), *Vicia faba* (Haba), *Cucurbita pepo* (Calabaza), *Solanum tuberosum* (Papa).

d) Agrícola

- **Cultivos a nivel:** En áreas de cultivo de nopal verdura y hortalizas-flores, se propone realizar la plantación o siembra de las especies en sentido perpendicular a la pendiente, con el propósito de reducir la pérdida de suelo fértil y materia orgánica por erosión hídrica y favorecer la infiltración en el área de cultivo.
- **Cultivos múltiples:** Se propone el uso de cultivos múltiples que involucren varios estratos de protección con el objeto de recuperar áreas de cultivo abandonados, con bajo potencial de retención de humedad y suelos carentes de estructura. El uso de cultivos múltiples permitirá optimizar espacial y temporalmente el uso de la tierra. Se sugiere la siembra de especies como: *Opuntia ficus indica* (Nopal), *Agave spp* (Maguey), *Zea mays* (Maíz), *Phaseolus vulgaris* (frijol), *Vicia faba* (Haba), *Cucurbita pepo* (calabaza), *Helianthus annuus* (Girasol), *Jatropha curcas* asociadas con leguminosas.

- **Terrazas de muro vivo:** Se propone construir bordos de tierra en sentido perpendicular a la pendiente que siempre deberán mantenerse con vegetación, pudiendo plantar las mismas especies producidas y especies leguminosas sugeridas para mejorar la fertilidad del suelo, aportar materia orgánica, reducir la velocidad y erosividad de los escurrimientos superficiales, impedir la formación de cárcavas y generar productos adicionales como alimento, forraje y leña.

2. Prácticas mecánicas

De acuerdo con los resultados obtenidos sobre aportación de sedimentos, el 47% de la superficie de la Microcuenca Río Milpa Alta presenta una pérdida de suelo por erosión hídrica (> 50 ton/ha/año) de Alta a Muy Alta y el 54 % de la superficie de la Microcuenca Río Cilcuayo presenta la misma problemática; por lo que, con el propósito de evitar el arrastre de partículas de suelo de las partes altas, disminuir el proceso erosivo de los escurrimientos superficiales, interceptarlos y conducirlos a velocidades no erosivas; evitar la formación y crecimiento de cárcavas, restaurar la morfología de los cauces; favorecer la retención e infiltración para el desarrollo de especies forestales y vegetación natural; se proponen las siguientes prácticas mecánicas:

- **Zanjas bordo:** Construir zanjas (0.40 m de profundidad x 0.40 m de ancho x 1.0 m de longitud) y diques de 0.30 m ó 0.40 m de separación, en

sentido perpendicular a la pendiente, siguiendo las curvas de nivel, el suelo excavado se colocará aguas abajo para formar el bordo que siempre deberá mantenerse con especies forestales, frutales o leguminosas y alrededor de los bordos y diques establecer pastos. Esta técnica permitirá interceptar el agua de escorrentía y aporte de sedimentos, aumentar la retención de humedad para el establecimiento y sobrevivencia de la vegetación nativa y las especies plantadas.

- **Terrazas individuales:** Construir terraplenes de forma circular (1.50 m de diámetro), trazados en sentido perpendicular a la pendiente y siguiendo las curvas nivel, en la parte central dejar un bordo para la plantación de especies forestales o frutales, técnica para el establecimiento y sobrevivencia de las especies utilizadas en la revegetación o reforestación principalmente en las áreas prioritarias.
- **Zanjas trinchera (tinas ciegas):** Se sugiere la construcción de zanjas de 0.40 m de profundidad x 0.40 de ancho x 2.0 de longitud, en forma discontinua (a tres bolillo), separados por un dique de 2.0 m de longitud, perpendicular a la pendiente y siguiendo las curvas de nivel; con el objeto de minimizar la erosión en laderas, retener el suelo de las escorrentías, captar agua e infiltrarla y mantener mayor humedad para el desarrollo de especies; con el suelo excavado formar un bordo en donde se plantarán

especies arbustivas como nopal o maguey y herbáceas como leguminosas y pastos mencionadas en el apartado de biotecnias.

3. Propuesta de prácticas agronómicas

- **Labranza de conservación:** En áreas de uso agrícola abandonadas o donde se presentan suelos sin estructura, se propone el sistema de labranza de conservación para favorecer el establecimiento de la cobertura vegetal para protección del mismo, dejar los residuos de las cosechas en el área de cultivo, con el objeto de reducir el proceso de escorrentía y pérdida de suelo fértil, mejorar la estructura del suelo y el aporte de materia orgánica.
- **Fertilización orgánica:** En áreas destinadas al uso agrícola, se sugiere la fertilización orgánica por medio de abonos verdes derivados del establecimiento de especies principalmente leguminosas, las cuales deberán incorporarse al suelo en forma de rastrojo para aportar nitrógeno, materia orgánica y estabilizar la estructura del suelo.
- **Control de pastoreo:** En áreas que presenten una cobertura vegetal menor o igual al 50% y áreas de regeneración, excluir el pastoreo, utilizar barreras naturales para distribuir, concentrar y controlar el ganado, ajustar

el número de animales en las diferentes estaciones del año sobre las áreas forestales para evitar el sobre pastoreo; planear el pastoreo rotativo en las áreas de bosque, matorral y pastizales, que presenten una cobertura vegetal media (50-75%).

- **Uso y manejo adecuado del agua de riego:** En las áreas de uso agroforestal se sugiere el uso racional del agua mediante sistemas de riego por goteo.
- **Barbecho de descanso:** En áreas agrícolas, se propone programar el uso en forma rotativa las áreas de cultivo dejando en descanso por un período de tiempo, con el propósito de recuperar las propiedades del suelo y del entorno.

4. Hidrotecnias.

La propuesta de hidrotecnias se basó en la zonificación para la implementación de estructuras temporales y permanentes para el control de azolves en causes y cárcavas. Como se mencionó en antecedentes, el desarrollo de hidrotecnias se refiere al diseño y construcción de obras de estructura transversal o longitudinal, cuyo propósito es controlar la formación, crecimiento y proceso erosivo en cárcavas, reducir la velocidad de escurrimiento, retener los sedimentos aportados, corregir y restaurar la morfología de los cauces; así

como crear condiciones favorables para el establecimiento de cobertura vegetal en taludes. Entre las hidrotecnias propuestas se mencionan:

- **Barreras de piedra:** Para retener el suelo en zonas con erosión hídrica media y de escasa cubierta vegetal, se sugiere realizar barreras de piedra colocadas de manera lineal en sentido perpendicular de la pendiente y siguiendo las curvas a nivel.
- **Cabeceo de cárcavas:** Con el objetivo de prevenir y reducir la magnitud de crecimiento en longitud aguas arriba de una cárcava y la consiguiente pérdida de suelo, se propone realizar el cabeceo en la parte inicial de éstas, recubriendo con rocas o material muerto.
- **Estabilización de taludes:** Para disminuir el aporte de sedimentos y permitir el desarrollo de la vegetación, se propone el recubrimiento de los taludes laterales de las cárcavas con rocas acomodadas y siembra de pastos o revegetación con arbustos.
- **Presas para el control de azolves:** Se propone la construcción de estructuras temporales como la presa de ramas, morillos, geocostales y piedra acomodada para cárcavas de medianas y pequeñas dimensiones. Estructuras permanentes para cárcavas de medianas a mayores dimensiones, como: Presa de alambre, presa de gaviones y mampostería, esta última con doble propósito para controlar la velocidad de los escurrimientos y almacenar agua en las cárcavas.

5. Obras para captación de agua de lluvia

Para el diseño y construcción de obras de captación de agua de lluvia, se tomó como referencia la zonificación para captación de escurrimientos superficiales. En áreas de reforestación de 1 a 30 m y áreas prioritarias, se sugiere el desarrollo de técnicas de captación *in situ*, tales como: Microcaptación Negarim, bordos al contorno y bordos semicirculares.

En áreas de captación de 30 a 200 m longitud; se sugiere la construcción de bordos trapezoidales y bordos de piedra al contorno, con el propósito de almacenar el agua para uso agrícola o como abrevadero y en áreas mayores a 200 m se sugiere el diseño y construcción de sistemas de inundación tales como: Presas permeables de piedra y bordos derivadores de escorrentía, que permitirán almacenar una mayor cantidad de agua para uso agrícola o para la plantación de especies.

Tabla 9. Estrategias de restauración hidrológico-forestal. Microcuencas Río Milpa Alta y Río Cilcuayo, Delegación Milpa Alta, Distrito Federal.

Tipo de vegetación y uso de suelo		Problemática	Propuesta
Área forestal (Bosque de Ables, Bosque de pino, Bosque de encino, Bosque mixto (pino-Alle), Matorral inerme	Pérdida de suelo por erosión hídrica	Biotechnias	• Barreras vegetales con especies herbáceas y arbustivas. • Terrazas de muro vivo con especies leguminosas y perennes. • Revegetación y/o reforestación
		Prácticas agronómicas	• Control de pastoreo • No quemar pastos • Dejar el mantillo
		Prácticas mecánicas	• Terrazas de tierra • Terrazas de piedra • Terrazas de muro vivo • Terrazas de absorción • Terrazas individuales • Zanjas trinchera • Zanjas bordo • Cepa común
Pastizales		Hidrotecnias	• Cabeceo de cárcavas • Estabilización de taludes • Estructuras transversales temporales y permanentes
	Pérdida de suelo por erosión hídrica	Biotechnias	• Barreras vegetales con especies herbáceas y arbustivas. • Fajas al contorno • Terrazas de muro vivo con especies leguminosas. • Siembra de pastos • Alternar cultivos de cobertera con leguminosas

Área agroforestal y Agrícola	Prácticas agronómicas	
	• Control de pastoreo • No quemar pastos • Labranza de conservación • Surcado lister	
	Prácticas mecánicas	
	• Terrazas de absorción • Terrazas de banco • Zanjas trinchera • Zanjas bordo	
	Hidrotecnías	
	• Cabeceo de cárcavas • Estabilización de taludes • Estructuras transversales temporales y permanentes	
	Pérdida de suelo por erosión hídrica	Biotecnias
		• Barreras vegetales con especies herbáceas y arbustivas. • Cercos vivos • Establecimiento de especies multipropósito • Intercalar cultivos múltiples • Terrazas de muro vivo • Cultivos de cobertura • Abonos verdes • Rotación de cultivos • Cultivos en fajas y callejones
		Prácticas agronómicas
		• Control de pastoreo • Labranza de conservación • Uso y manejo adecuado del agua de riego • No quemar el pasto • Aumentar la densidad de los cultivos • Aplicar variedades y especies de alta producción de rastrojo • Barbecho de descanso
		Prácticas mecánicas
		• Terrazas de tierra • Terrazas de piedra

		• Terrazas de muro vivo • Terrazas de absorción • Terrazas individuales • Zanjias trinchera • Zanjias bordo • Cepa común • Surcados lister • Surcado al contorno Hidrotecnias • Cabeceo de cárcavas • Estabilización de taludes • Estructuras transversales temporales y permanentes
	Bajos niveles de materia orgánica	▪ Aplicación de abonos verdes y compostas ▪ Dejar rastrojos ▪ Cultivos de cobertura ▪ Labranza de conservación ▪ Leguminosas intercaladas ▪ Rotación de cultivos
	Baja infiltración	▪ Dejar rastrojos ▪ Cultivos de cobertura ▪ Aplicación de abonos orgánicos ▪ Labranza cero ▪ Cambio de variedad de cultivos
	Baja retención de humedad	▪ Incorporación de abonos verdes ▪ Cambio de variedad de cultivos ▪ Uso y manejo adecuado del agua de riego (goteo)
	Lixiviación	▪ Rotación de cultivos y leguminosas ▪ Cultivos perennes ▪ Cultivos en fajas
	Fertilidad	▪ Aplicación de abonos orgánicos ▪ Aplicación fraccionada de fertilizantes ▪ Cultivos de cobertura ▪ Cultivos en fajas y callejones ▪ Barbechos de descanso ▪ Siembra de leguminosas ▪ Mantenimiento del mantillo

6. DISCUSIÓN

De acuerdo con FAO (1994), la función de un Sistema de Información Geográfica (SIG) es la de mejorar nuestra capacidad para la toma de decisiones; a este respecto a través del SIG basado en los parámetros generados por medio de la simulación del modelo para la predicción de pérdida de suelo, se definieron áreas de mapeo que indican el índice de escurrimiento superficial y grado de pérdida de suelo. En la Microcuenca Río Milpa Alta el 72% de la superficie presenta un índice de escurrimiento máximo instantáneo (Q_p , m^3/seg) Moderadamente alto ($> 170 m^3/seg$), el 15% de la superficie presenta un índice de pérdida de suelos Muy alto ($> 200 ton/ha/año$) y 32% índice alto (50-200 $ton/ha/año$). En la Microcuenca Río Cilcuayo el 56% de la superficie presenta un índice de escurrimiento máximo instantáneo moderado (50-170 m^3/seg), el 25% de la superficie presenta un índice de pérdida de suelos Muy alta y 29% Alto.

Según Jones R. H., C. A., *et al.*, (1991), los modelos de simulación de pérdida de suelo son modelos de parámetros agrupados que utilizan información promedio sobre suelos, cultivos, pendientes y manejo para un segmento de pendiente. De acuerdo a lo anterior, para la estimación de aportación de sedimentos a una sección del cauce se desarrolló el modelo de simulación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (EUPSM) para estimar el rendimiento de sedimentos para un evento pluvioso único (Y , $ton/ha/año$) en los últimos 10 años de observación de 20 estaciones ubicadas en el área de influencia de la zona de estudio, se

procesaron 3365 polígonos correspondientes a la microcuenca Río Milpa Alta en donde el 47% de la superficie presenta una pérdida de suelo mayor a 50 ton/ha/año y 467 polígonos para la Microcuenca Río Cilcuayo en la cual el 54% de la superficie también presenta una pérdida de suelos mayor a 50 ton/ha/año.

El conocimiento de los modelos matemáticos predictivos de pérdida de suelo son importantes para proyectar escenarios, su aplicación requiere del reconocimiento del sitio y datos mínimos necesarios para alimentarlos, sin los cuales se corre el riesgo de subestimar o sobreestimar dichos procesos (FAO, 1994). A este respecto se realizaron dos recorridos en el área de estudio verificando la pérdida de suelo en algunos sitios, el estado de la cubierta vegetal y las prácticas de conservación de suelos realizadas, que sirvieron de apoyo para determinar el parámetro de prácticas de conservación en el modelo para estimar la pérdida de suelos. De acuerdo a los parámetros hidrológicos y pérdida de suelo obtenidos, se llevó a cabo la zonificación del área de estudio para determinar la propuesta de restauración hidrológico-forestal. En la Microcuenca Río Milpa Alta el 34% de la superficie requiere de la implementación de biotecnias, prácticas mecánicas e hidrotecnias, el 32% de la implementación de hidrotecnias y el 22% de la aplicación de biotecnias. En la Microcuenca Río Cilcuayo en el 55% de la superficie se propone el desarrollo de biotecnias y prácticas mecánicas, el 22% de la implementación de biotecnias, prácticas mecánicas e hidrotecnias y el 16% del desarrollo de biotecnias.

Spanner *et al.*, (1982), menciona el uso de los SIG en la predicción de pérdida de suelo, presentando en forma de un mapa la erodabilidad a partir del modelo de elevación digital. De igual manera, para representar el índice de aportación de sedimentos, el SIG se basó en los parámetros obtenidos mediante el modelo de simulación de la EUPSM. El 15% de la Microcuenca Río Milpa Alta presenta una aportación de sedimentos Muy alta (> 200 ton/ha/año), 32% Alto (50-200 ton/ha/año), 28% Moderado (10-50 ton/ha/año) y 25% Ligero (<10 ton/ha/año). La Microcuenca Río Cilcuayo el 25% de la superficie presenta una aportación de sedimentos muy alta, 29% Alto, 29% Moderado y 17% Ligero.

Para la predicción de escenarios, análisis y toma de decisiones en el manejo de cuencas, los Sistemas de Información Geográfica se realizan bajo diversos enfoques (FAO, 1994); en este punto, el SIG se basó en parámetros obtenidos a través de un modelo de simulación para la predicción de pérdida de suelo (EUPSM) cuyo enfoque es agrupado, continuo (registro por evento pluvioso) y unidades de suelo homogéneas.

De acuerdo con SEMARNAP (1998), la restauración ecológica comprende una serie de acciones orientadas a recuperar la cobertura vegetal y devolver a los ecosistemas alterados, las condiciones que existían previamente al disturbio; bajo esta perspectiva y con el objeto de recuperar principalmente la cubierta vegetal de las microcuencas Río Milpa Alta y Río Cilcuayo, se propone una serie de biotecnias a desarrollar en las áreas donde (Q_p) es de índice bajo a medio y el índice de (Y) bajo, estas áreas se localizan en las

partes altas de las microcuencas lo cual sugiere que son las zonas que primero se deben restaurar, esto permitiría en un corto plazo recuperar parte de la cubierta vegetal; frenar el proceso erosivo y la consecuente acumulación de sedimentos en las partes medias y bajas de las microcuencas.

La Cuenca constituye una unidad espacial ecogeográfica para analizar los procesos ambientales generados a partir de la toma de decisiones sobre el uso y manejo de los recursos (INE, 2003). A partir de las variables hidrológicas, aportación de sedimentos y la zonificación para la restauración hidrológico-forestal, se precisaron las áreas prioritarias que de acuerdo con (Granados *et al.*, 2006), el grado de complejidad e interrelación entre sus componentes, puede manejarse y controlarse con estructuras físicas, coberturas vegetales o simplemente mantenerse en las condiciones naturales o de alteración antropogénica. En la Microcuenca Río Milpa Alta el mayor porcentaje de áreas prioritarias corresponde al Bosque de pino con 52%, seguido del bosque mixto con 33%, pastizal 9% y Bosque de oyamel 9%. En la Microcuenca Río Cilcuayo el bosque de pino representa el 70%, pastizal 10%, bosque de oyamel el 9% y bosque de encino 9%; en donde se propone el desarrollo de biotecnias, prácticas mecánicas y agronómicas.

Según TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio de Medio Ambiente (1998), al desarrollar un proyecto de restauración hidrológico-forestal se debe considerar la conservación estricta de aquellas especies singulares de la cubierta vegetal, reducir al máximo el uso de especies exóticas, dando

prioridad a los ecotipos propios del área a restaurar. Para la propuesta de biotecnias a desarrollar, se sugiere la regeneración a través de la siembra o plantación de especies arbóreas, arbustivas y herbáceas de acuerdo al tipo de asociación vegetal existente en el área: Bosque de Abies, Bosque de pino, Bosque de pino-encino, Matorral inerme y Bosque mixto (Bosque de Pino-Aile), incluyendo aquellas especies para recuperación de áreas riparias y pastizales; así como el establecimiento de técnicas para la recuperación de suelos y vegetación como el establecimiento de barreras vivas, cercos vivos y terrazas de muro vivo por siembra o plantación con la incorporación de especies leguminosas.

Las biotecnias de restauración hidrológico-forestal, es el conjunto de técnicas que es necesario aplicar para crear una cubierta o masa forestal (Serrada, 1993 *citado por* TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio de Medio Ambiente, 1998); a este respecto, se han sugerido diversas biotecnias con el propósito de recuperar la cubierta vegetal de aquellos sitios localizados en el límite del área de bosque, áreas riparias, matorrales y pastizales; que consiste en técnicas vegetativas que tienen como objetivo el establecimiento de mosaicos de vegetación heterogénea para la estabilidad de los ecosistemas presentes en el área de estudio.

En terrenos de uso agrícola y agroforestal, se propone la diversificación y rotación de cultivos (Anaya *et al.*, 1991), entre las técnicas sugeridas se menciona el uso de barreras vegetales, terrazas de muro vivo, cercos vivos, cultivos múltiples, uso de abonos verdes, cultivos a nivel y en fajas, uso de

cultivos de cobertera y revegetación y/o reforestación con especies de usos múltiples.

Anaya *et al.*, (1991), indican que la recuperación y/o conservación de la cubierta vegetal, se realiza bajo dos procesos de regeneración: La repoblación natural que requiere de cierto tiempo para el establecimiento de las especies y la regeneración inducida que se realiza mediante técnicas de revegetación y/o reforestación principalmente con especies nativas. Para tal propósito, en las áreas de bosque se ha propuesto la reforestación y plantación de especies arbóreas y arbustivas de las asociaciones vegetales presentes en las Microcuencas Río Milpa Alta y Río Cilcuayo como Bosque de Abies, bosque de pino, bosque de encino, bosque mixto (pino-aile), matorral y pastizales; bajo el criterio de que la diversidad de especies conduce a la estabilidad de los ecosistemas.

De acuerdo con Simon, N. E. (1992), se debe llegar a una vegetación estable y permanente dadas las condiciones del medio en cuanto a composición formación y estructura; así mismo, TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio de Medio Ambiente (1998), indican que la propuesta de restauración debe definir la estructura y función de la vegetación a recuperar; para lograr este objetivo, se zonificaron las áreas prioritarias y homogéneas para definir la técnica de restauración y selección de especies arbóreas, arbustivas y herbáceas y método de revegetación ya sea por siembra o plantación, tipo de asociación vegetal y uso del suelo presente en el área de estudio.

En virtud de que el área de estudio se encuentra dentro del "Suelo de Conservación del Distrito Federal" (SAGARPA, GDF, FIRCO y CORENADER, 2004) y de acuerdo con TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio de Medio Ambiente (1998), se debe conservar en la medida de lo posible la vegetación preexistente, utilizando técnicas de preparación del terreno menos agresivas; se sugirió a través de prácticas agronómicas, el desarrollo de la labranza de conservación (FAO-IITA, 1997). En vista de que algunos sitios ubicados en los límites de las áreas de bosque el suelo carece de estructura, se propone la labranza cero y el uso de cultivos alternados, incorporando especies leguminosas y pastizales que permitirán proteger el suelo del proceso erosivo de los escurrimientos superficiales, disminuir la pérdida de suelo fértil, aportar materia orgánica, aumentar el índice de infiltración, mejorar la estructura del suelo e enriquecerlo con nitrógeno; así como proporcionar alimento para el ganado.

De acuerdo con Anaya *et al.*, (1991), para la recuperación de la cubierta vegetal en áreas bajo pastoreo se debe planear esta actividad, por lo que, para recuperar las áreas de pastizal, matorral y forestal bajo pastoreo, se sugiere adoptar la modalidad de pastoreo rotativo en aquellas que presenten una cobertura vegetal media y excluirlo en áreas que presenten menos del 50%; así como acotar la cantidad de animales en las diferentes estaciones del año para evitar el sobrepastoreo en áreas de regeneración natural e inducida.

De acuerdo con Anaya *et al.*, (1991); Becerra (2000); TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio de Medio Ambiente (1998), CONAFOR (2007), las medidas de defensa son obras cuyo fin es detener la acción del agua o el viento y evitar la pérdida de suelo. Se propone el desarrollo de prácticas mecánicas como la construcción de terraplenes y zanjas que favorezcan el proceso de infiltración y establecimiento de especies vegetales; la construcción de presas temporales y presas permanentes que contribuyan a reducir el proceso erosivo en cárcavas y cauces, principalmente en aquellas áreas donde el escurrimiento superficial es de moderado a moderadamente alto y la pérdida de sedimentos es de Alto a Muy Alto (mayor a 50 ton/ha/año).

(González y García, 1998), menciona que la restauración de áreas ribereñas tiene como objetivo retomar el cauce a un estado próximo al natural. En la recuperación morfológica de los cauces; se ha sugerido la implementación de prácticas vegetativas para la estabilización de taludes por medio de siembra de pastos y especies arbustivas de rápido crecimiento y construcción de presas para el control de azolves temporales o permanentes.

De acuerdo con Anaya *et al.*, (1991), las labores de terraceo, cultivos al contorno o cualquier otra técnica que reduzca la velocidad de esorrentía incrementa el índice de infiltración. Se ha sugerido el desarrollo de prácticas mecánicas que permitan la retención de humedad e infiltración, para el establecimiento y desarrollo de la vegetación; entre éstas, el surcado al

contorno y surcado lister en áreas agrícolas y pastizales; la construcción de zanjas bordo, zanjas trinchera, terrazas de muro vivo, terrazas de formación sucesiva en áreas forestales, agrícolas, agroforestales y pastizales.

El cálculo de la producción de sedimentos es un importante elemento de criterio para la toma de decisiones en el manejo integral de cuencas (Becerra, 2000); por lo que en la propuesta de restauración hidrológico-forestal, el desarrollo de hidrotecnias tendrá como objetivo controlar el proceso erosivo en cárcavas, realizar la restauración de cauces a través de la corrección morfológica y la revegetación de áreas riparias (TRAGSA, TRAGSTEC y Ministerio de Medio Ambiente, 1998; CONAFOR, 2007).

Con el objetivo de disminuir el proceso de pérdida de suelo por erosión hídrica en las Microcuencas Río Milpa Alta y Río Cilcuayo que representan aproximadamente el 50% de la superficie en cada microcuenca en un orden de pérdida mayor a 200 ton/ha/año de suelo, se ha sugerido la construcción de obras para el control de azolves, tales como barreras de piedra en aquellas zonas carentes de vegetación. En áreas con formación media o avanzada de cárcavas, se sugiere la construcción de obras para control de azolves temporales y permanentes; en áreas con formación inicial de cárcavas se sugiere el cabeceo de éstas para disminuir su crecimiento y proceso erosivo. Para la restauración de taludes en cárcavas medianas y grandes, se propone la estabilización a través del recubrimiento con rocas o revegetar a través de la siembra de pastos y especies arbustivas de rápido crecimiento.

Becerra (2000), menciona que el suelo es uno de los factores de mayor incidencia en el escurrimiento y las características como textura y contenido de materia orgánica son factores importantes en el proceso de infiltración y velocidad de escurrimiento. En vista de que en ambas microcuencas presentan suelos de origen volcánico y en ciertas áreas el suelo carece de estructura debido al bajo contenido de arcillas y escasa cubierta vegetal; cualquier corriente superficial tiende a arrastrar grandes cantidades de suelo. En el caso de la Microcuenca Río Milpa Alta, la aportación de sedimentos por erosión hídrica Alta-Muy alta (> 50 ton/ha/año) representa el 47% de la superficie de la microcuenca y la Microcuenca Río Cilcuayo el 54%.

Por lo anterior, se han sugerido prácticas mecánicas como terraceo a nivel, terrazas de muro vivo, terrazas individuales; hidrotecnias como la construcción de presas para control de azolves, cabeceo de cárcavas y estabilización de taludes (CONAFOR, 2007; TRAGSA, TRAGSTEC y Ministerio de Medio Ambiente, 1998; Anaya *et al.*, 1991; Becerra, 2000); cuyo propósito es disminuir el grado y longitud de la pendiente; interceptar los escurrimientos superficiales, reducir su velocidad y conducirlos a velocidades no erosivas, disminuir el índice de aporte de sedimentos, impedir la formación y crecimiento de cárcavas y favorecer el proceso de infiltración para el establecimiento, sobrevivencia y desarrollo de las especies establecidas.

Anaya *et al.*, (1991), indican que los escurrimientos superficiales de una cuenca dependen de las características fisiográficas, la cobertura vegetal, y

el tipo de suelo; siendo la textura y contenido de materia orgánica los componentes básicos en la magnitud y modalidad de los escurrimientos; a este respecto, las Microcuencas Río Milpa Alta y Río Cilcuayo, presentan suelos con textura media cuya magnitud y modalidad de escurrimientos es de ligero a moderadamente alto, cobertura vegetal de regular a mala y en algunas áreas de uso agrícola el suelo carece de estructura, por lo que en la Microcuenca Río Milpa Alta el escurrimiento superficial medio (Q), con un índice moderado a moderadamente alto, representa el 69% de la superficie. El escurrimiento superficial máximo instantáneo (Q_p) índice moderado a moderadamente alto el 80%. Para la Microcuenca Río Cilcuayo (Q) con un índice de moderado a moderadamente es de 98.89% y (Q_p) de 80.41%; indicando que la escasa cobertura vegetal y la magnitud de los escurrimientos superficiales provocan un mayor arrastre de sedimentos.

TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio de Medio Ambiente (1998), indican que al realizar cualquier proyecto de restauración hidrológico-forestal, se debe incluir medidas tendientes a la conservación de los usos tradicionales de la comunidad; como menciona (SECOPS,2000), la comunidad rural del área de estudio hace el aprovechamiento de recursos como madera, leña, hongos, plantas medicinales y aromáticas. En áreas agrícolas dedicadas al cultivo de nopal que tradicionalmente ha sido un medio de subsistencia de la población rural del área de estudio, se sugiere combinar este cultivo con especies leguminosas, intercalar cultivos de cobertura y adicionar abonos orgánicos para el enriquecimiento del suelo, desarrollar prácticas mecánicas

que permitan el almacenamiento, infiltración de agua y establecimiento de especies que sirvan como barrera y protección del suelo.

Según (Nair P. K. R., 1985), los sistemas agroforestales son sistemas y tecnologías de uso de la tierra donde se establecen especies leñosas junto con ciertos cultivos bajo un arreglo espacial o secuencia temporal; por lo que se ha sugerido el mejoramiento de los sistemas agroforestales del área, mediante la siembra de cultivos anuales y perennes, la plantación de especies arbóreas frutales adaptadas al clima de la región y la siembra de especies arbustivas leguminosas, con el propósito de dar protección al suelo, promover el reciclaje de nutrientes, adicionar nitrógeno al suelo y obtener productos adicionales como forraje, leña y frutos.

(SAGARPA, GDF, FIRCO y CORENADER, 2004), expone que en el área de estudio la ganadería es uno de los principales factores de amenaza para la permanencia del bosque y la principal causa de la afectación de la regeneración natural e inducida; bajo esta problemática, se ha sugerido la revegetación de las áreas de matorral y pastizal con especies de pastos y leguminosas resistentes a la sequía, que sirvan como forraje verde, pastura, abono y cubierta del suelo; además de proponer el pastoreo rotativo, que de acuerdo con Anaya *et al.*, (1991), promueve la regeneración en las áreas sometidas a esta actividad.

De acuerdo con FAO (1997), la tecnología sobre captación de agua de lluvia es especialmente importante en zonas áridas y semiáridas y donde los

problemas de degradación ambiental, sequía y presiones de la población sobre el recurso agua son más evidentes. En vista de que las Microcuencas Río Milpa Alta y Río Cilcuayo en algunas áreas presentan una cobertura vegetal media e índices de escurrimiento superficial (Q) de moderado a moderadamente alto y baja producción de sedimentos (Y); se sugiere el desarrollo de técnicas para la captación de agua *in situ* como microcaptaciones que permitirán el establecimiento y sobrevivencia de árboles y arbustos para la revegetación y restauración de áreas degradadas. Obras de captación *ex situ* como sistemas de derivación, inundación y distribución de torrentes cuyo objetivo es el almacenamiento temporal para la producción de cultivos o abrevaderos para el ganado.

INE (2003), menciona que la cuenca constituye una unidad espacial ecogeográfica relevante para analizar los procesos y funciones ambientales generados. A través de la propuesta de restauración hidrológico-forestal para las Microcuencas Río Milpa Alta y Río Cilcuayo, tiene como objetivo principal la recuperación de la cubierta vegetal a través de la implementación de prácticas vegetativas, agronómicas, mecánicas e hidrotecnias que a su vez tiene la finalidad de lograr funciones ambientales como la captación de agua de precipitación para almacenamiento en el perfil del suelo y subsuelo, generación, conservación y recuperación de suelos; proveer de hábitat para la flora fauna, constituir zonas de captura de CO₂, albergar bancos de germoplasma, la conservación de la biodiversidad entre otros bienes y servicios ambientales.

Según TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio de Medio Ambiente (1998), se debe fomentar la difusión de campañas informativas sobre los objetivos y beneficios de las acciones para la restauración hidrológico-forestal de la cuenca. Bajo esta perspectiva a través de la propuesta de restauración hidrológico-forestal para las Microcuencas Río Milpa Alta y Río Cilcuayo se pretende promover el desarrollo socioeconómico a través de la utilización de recursos para fomentar actividades productivas, sociales, culturales, paisaje y recreación a la comunidad.

7. CONCLUSIONES

La determinación de variables hidrológicas y la producción de sedimentos por modelos de simulación matemática y el uso de los Sistemas de Información Geográfica, son parte importante para la planeación y desarrollo de actividades tendientes a la restauración hidrológico-forestal de una cuenca hidrográfica. A través del planteamiento y desarrollo de la metodología en esta investigación, se pretende determinar las características físicas que condicionan el comportamiento hidrológico y el estado de la cubierta forestal, indicando que se encuentran altamente disectadas, precisando los sitios que presentan severos problemas de pérdida de suelo por erosión hídrica, falta de cobertura vegetal y ausencia de prácticas mecánicas y agronómicas para conservación del suelo y agua.

Las propuestas de restauración hidrológico-forestal a través de técnicas preventivas y correctivas de conservación de suelos y agua para las Microcuencas Río Milpa Alta y Río Cilcuayo, basado en la estimación de escurrimientos superficiales, pérdida de suelo a través del modelo de simulación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (EUPSM) y la representación gráfica de las variables correspondientes, tiene como resultado la obtención de cartas temáticas conformadas por unidades de mapeo que indican los índices de escurrimiento superficial, el grado de pérdida de suelo, las áreas prioritarias y homogéneas para su restauración,

la distribución de técnicas biológicas y mecánicas y la combinación de éstas en ambas microcuencas.

Se concluye que el uso de los Sistemas de Información Geográfica en la simulación de modelos de pérdida de suelo, conforman un instrumento para el manejo, conservación y mejoramiento de los recursos: vegetación, suelo y agua, que de manera implícita tiene como propósito la conservación de hábitats para la fauna, generación de bienes, productos y servicios ambientales.

Sin embargo, la implementación y factibilidad de esta propuesta, dependerá principalmente del interés y compromiso de la comunidad y autoridades, la disponibilidad de recursos humanos, materiales y económicos.

8. RECOMENDACIONES

La aplicación de los modelos matemáticos predictivos de pérdida de suelo son importantes para proyectar escenarios a través del establecimiento de variables físicas y biológicas de una cuenca hidrográfica; sin embargo para evaluar su efectividad se requiere del establecimiento de parcelas o sitios demostrativos que permitan el monitoreo continuo de las variables involucradas.

Existe la necesidad de crear sistemas que permitan manejar de forma integral parámetros físicos y biológicos de acuerdo a las características ecológicas de los ecosistemas que forman las diferentes regiones biogeográficas de nuestro país para la predicción de escenarios.

A partir del desarrollo de los modelos predictivos de pérdida de suelos, zonificación para la restauración hidrológico-forestal y la georreferenciación de los sitios para el establecimiento de hidrotecnias, se requiere generar sistemas que permitan proyectar los perfiles, taludes y dimensiones de las cárcavas; así como determinar el tipo de estructura a implementar, estimar materiales, mano de obra y costos de construcción para la restauración de estas áreas.

9. LITERATURA CITADA

- Anaya G., M., Martínez M., M. R., Trueba C., A., Figueroa S., B., y Fernández M., O. 1991. Manual de Conservación del Suelo y del Agua. 3ª. Ed. Colegio de Postgraduados. Montecillos, Edo. de México. 584 pp.
- Aparicio M., 2007. Fundamentos de hidrología de superficie. Limusa-Noriega Editores. México. 303 pp.
- Arnold, J.G. and N.B. Sammons. 1989. Decision suport system for selecting inputs to a basin scale modal. Water Resources Bulletin Vol. 24, N° 4.
- Barringer, T, D. Dunn, R. Ulery, and E. Declercq. 1987. Two-dimensional display of geographically-referenced three-dimensional hydrologic vector fields. International Geographic Information Systems (IGIS) symposium: Proceedings Vol. III: 131-136.
- Becerra M., A. 2000. Escorrentía, Erosión y Conservación de Suelos. UACH, Chapingo, México. 376 pp.
- Berry, J.K. 1987. A mathematical structure for analyzing maps. J. Environmental Management 11 :317-325
- Bingner, R.L. 1989. Using graphic interfaces to present the results of erosión models. Proceedings of the ASAE/CSAE Summer Meeting, Quebec, Canada, ASAE, St. Joseph, MI.
- Brañes R. 1994. Manual de Derecho Ambiental Mexicano. Fundación mexicana para la educación Ambiental fondo de cultura Económica. México. 792 pp.
- Campos A., D. F. 1998. Procesos del Ciclo hidrológico. UASLP. Facultad de Ingeniería. SLP. México. Ed. Universitaria Potosina. (2-12; 8-28)
- CONAFOR. 2007. Protección, Restauración y Conservación de Suelos Forestales. Manual de Obras y Prácticas. 3ª. ed. México. 298 pp.
- CORENA. 2005. Mapas vectoriales de uso de suelo y vegetación, Unidades edafológicas. Delegación Milpa Alta Ed. 2005.
- CORENA. 2005. Mapas vectoriales Microcuenca Río Milpa Alta y Río Cilcuayo. Ed. 2005.

- FAO, PNUMA-UNESCO. 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Publicaciones FAO. Roma, Italia. 86 pp.
- FAO 1994. Erosión de suelos en América Latina. Taller sobre la utilización de un SIG en la Evaluación de la Erosión Actual de Suelos y la Predicción del Riesgo de Erosión Potencial. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/t2351s/T2351S04.htm>
- FAO. 1995. Estrategias para la agricultura y el desarrollo rural sostenible. Nuevas Orientaciones para el sector agrícola, forestal y pesquero. Roma, Italia. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/005/x20385/x203850a.htm>
- FAO. 1997. Manual de captación de agua de lluvia. Traducción de: Anaya G., M. Publicación Especial No. 6. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo (SMCS). Chapingo, México. 128 pp.
- FAO-IITA. 1997. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. Boletín de tierras y aguas de la FAO No. 8. Disponible en: http://www.fao.org/ag/ags/AGSE/agse_s/7mo/iita/iita.htm
- FAO. 2008. ¿Qué es la agricultura de conservación?. Disponible en: <http://www.betuco.be/CA/Agricultura%20de%20Conservacion%20-%20Fao%20Maquinaria.pdf>.
- García, E., 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía. UNAM. México. 246 pp.
- GDF-CORENA (2000) Programa General de Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal. 75 p.
- González del Tánago, del R., M. y García de Jalón, L., D. 1998. Restauración de Ríos y Riberas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. 319 pp.
- Granados S., D; Hernández G., M. A; y López R., G. 2006. La cuenca hidrológica. Unidad ecológica de manejo. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 164 pp.
- Heatwole, C. D. 1990. Knowledge-based interface for improved use of models as management tools. Presented in ASAE 1990 International winter meeting, Paper No. 90-2642, ASAE, St. Joseph, MI.
- INE. 2003. Manejo integrado de cuencas URL. Disponible en: <http://www.ine.gob.mx/dgoece/cuencas/conceptos.html>. (septiembre 2004).

- INEGI. 1980. Carta de uso de suelo y vegetación, Escala 1:250 000.
- INEGI. 1980. Carta topográfica E14A49, E14B41, Escala 1:50 000
- INEGI. 2008. Carta topográfica digital E14A49, Escala: 1:50 000
- INEGI. 2008. Carta topográfica digital E14B41, Escala 1:50 000
- Jones, R.H, C. A., Griggs, J.R. Williams y R. Srinivasa, 1991. Predicción de la erosión hídrica y eólica del suelo. Erosión de suelos en América Latina.
Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/t2351s/T2351S04.htm>
- Márquez H., R. 2003. Restauración Ecológica. Instituto Nacional de Ecología.
Disponible en: www.ine.gob.mx/dgoece/con_eco/conhc/webredine.html.
- Monsalve S., G. 2006. Hidrología en la ingeniería. Ed. Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia. 382 pp.
- Ramachandran Nair, P. K. 1985. Clasificación de agroforestry systems. Agroforestry Systems 3:07-128. Martinus Nijhoff Publishers. The Netherlands.
- SAGARPA, GDF, FIRCO y CORENADER. 2004. Plan rector de producción y conservación de la microcuenca Río Milpa Alta, Delegación Milpa alta, D. F. 74 pp.
- SECOPS, 2000. Diagnostico Socioeconómico de Milpa Alta, Servicio de Consultoría y Operación de Proyectos Sociales S.C.
- SEMARNAP. 1998. Campaña de Restauración Ecológica y contra cambio de uso del suelo, en áreas afectadas por incendios forestales. Primera Edición Semarnap México.
- SEMARNAT. 2000. Ordenamiento Ecológico General del Territorio. Memoria técnica 1995. 540 pp.
- SEMARNAT, UACH. 2001-2002. Evaluación de la pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica en la cuenca Lerma-Chapala. Esc. 1:250 000. México. 120 pp.
- SEMARNAT 2003. Introducción a los servicios ambientales. Revista Forestal (09/2004) 71 pp.
- Shanholtz, V. O., and N. Zhang. 1989. GIS/Hydrologic modal interface for local planning jurisdictions. Paper No. 89-2652. ASAE, St. Joseph, MI.

Soil Conservation Service. 1972. National Engineering Handbook. United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service, United States Government Printing Office, Washington, D.C.

Spanner, M. A, A.H.Strahler and J. E. Estes. 1982. Soil Loss Prediction in a Geographic Information System Format. 16th International Symposium on Remote Sensing of the Environment. Buenos Aires, Argentina.

Wischmeier, W. H. and D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. USDA Agriculture Handbook. No. 537. Washington, D.C. USA. 58 pp.

Shoup, W.D., and W.J. Becker. 1985. Computer graphic animation for instruction of hand signal communication. Applied Engineering in Agriculture. 1(1): 3-5.

Simon, N. E. 1992. Diseño de nuevas repoblaciones. Curso Internacional sobre Ordenación Agrohídrológica y Restauración Hidrológico-Forestal de Cuencas. TRAGSA, FAO, AECL. Segovia, España.

TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio de Medio Ambiente. 1998. Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión. Ingeniería Medioambiental. Ed. Mundi-Prensa. 2^a. Ed. Madrid, España. 945 pp.

<http://www.siem.gob.mx>

10. ANEXOS

Cuadro 5. Tipos de vegetación, Milpa Alta

Tipo de vegetación	Comunidad vegetal		Asociaciones
Bosque de coníferas	<i>Pinus hartwegii</i>		<i>Muhlenbergia quadridentata</i> – <i>Pinus hartwegii</i> <i>Festuca tolucensis</i> - <i>Pinus hartwegii</i>
	<i>Pinus montezumae</i>		<i>Festuca tolucensis</i> – <i>Pinus montezumae</i> <i>Muhlenbergia quadridentata</i> - <i>P. montezumae</i> <i>Muhlenbergia macroura</i> – <i>P. montezumae</i>
	<i>Abies religiosa</i>		<i>Roldana angustifolius</i> – <i>Abies religiosa</i> <i>Roldana barba-johannis</i> – <i>Abies religiosa</i> <i>Alnus</i> spp – <i>Abies religiosa</i> <i>Pinus</i> spp- <i>Alnus</i> spp – <i>Abies religiosa</i>
Bosques Mixtos	<i>Pinus</i> spp – <i>Alnus</i> spp		<i>Pinus montezumae</i> – <i>Alnus</i> spp
Pastizales	Zacatonal Pradera	Subalpino-	<i>Trisetum spicatum</i> – <i>Festuca tolucensis</i> <i>Muhlenbergia quadridentata</i> – <i>M. ramulosa</i> <i>Festuca amplissima</i> <i>Stipa ichu</i> – <i>Potentilla candicans</i>

Fuente: (SAGARPA, GDF, FIRCO y CORENADER. 2004)

Cuadro 6. Cobertura vegetal

Condición de la cubierta vegetal	Porcentaje de cobertura
Buena	>75%
Regular	50 – 75%
Mala	< 50%

Fuente: (CONAFOR, 2007)

Cuadro7. Clasificación hidrológica de los suelos

GRUPOS DE SUELOS	CARACTERÍSTICAS
A ARENOSO ARENOSO-FRANCO FRANCO-ARENOSO	Bajo potencial de escurrimiento Suelos que presentan mayor permeabilidad Arenas profundas con muy poco limo y arcilla, migajones arenosos, suelo permeable con grava en el perfil Altas tasas de infiltración Infiltración básica 8-12 mm/hr
B FRANCO LIMOSO FRANCO-LIMOSO	Suelos que presentan moderada permeabilidad cuando están saturados Moderadamente bajo potencial de escurrimiento y moderadas tasas de infiltración Suelos arenosos menos profundos y más agregados que el grupo A. Infiltración mayor que el promedio en condiciones húmedas. Suelos migajones, arenosos ligeros y migajones limosos. Infiltración básica 4-8 mm/h
C FRANCO-ARCILLO-ARENOSO FRANCO-ARCILLO-LIMOSO FRANCO-ARCILLOSO	Suelos con poca permeabilidad cuando están saturados Moderadamente alto potencial de escurrimiento Suelos someros y suelos con considerable contenido de arcilla Infiltración menor que la promedio después de saturación Suelos migajones, arcillosos. Infiltración básica 1-4 mm/hr
D ARCILLO-ARENOSO ARCILLO-LIMOSO ARCILLOSO	Suelos con alto potencial de escurrimiento, mayor impermeabilidad Suelos pesados, casi impermeable, con alto contenido de arcillas expandibles y suelos someros con materiales fuertemente cementados Infiltración lenta, menor a 1 mm/hr

Fuente: (CONAFOR, 2007; López, 1998)

Cuadro 8. Curva numérica para estimar la escorrentía bajo diferentes complejos suelo-cobertura y manejo (Datos para la condición II y condición de humedad previa $I_a = 0.2^*S$)

USO DE SUELO	TRATAMIENTO O PRÁCTICA	CONDICIÓN HIDROLÓGICA	GRUPO DE SUELOS			
			A	B	C	D
			CURVA NUMÉRICA			
Suelo en descanso	Surcos rectos		77	86	91	94
Cultivo de escarda	Surcos rectos	Mala	72	81	88	91
	Surcos rectos	Buena	67	78	85	89
	Curvas a nivel	Mala	70	79	84	88
	Curvas a nivel	Buena	65	75	82	86
	Terraza y curva a nivel	Mala	66	74	80	82
	Terraza y curva a nivel	Buena	62	71	78	81
Cultivos tupidos	Surcos rectos	Mala	65	76	84	88
	Surcos rectos	Buena	63	75	83	87
	Curvas a nivel	Mala	63	74	82	85
	Curvas a nivel	Buena	61	73	81	84
	Terraza y curva a nivel	Mala	61	72	79	82
	Terraza y curva a nivel	Buena	59	70	78	81
Leguminosas en hilera o forraje en rotación	Surcos rectos	Mala	66	77	85	85
	Surcos rectos	Buena	58	72	81	85
	Curvas a nivel	Mala	64	75	83	85
	Curvas a nivel	Buena	55	69	78	83
	Terraza y curva a nivel	Mala	63	73	80	83
	Terraza y curva a nivel	Buena	51	67	76	80
Pastizales	Sin tratamiento mecánico	Mala	68	79	86	89
	Sin tratamiento mecánico	Regular	49	69	79	84
	Sin tratamiento mecánico	Buena	39	61	74	80
	Curvas a nivel	Mala	47	67	81	88
	Curvas a nivel	Regular	25	59	75	83
	Curvas a nivel	Buena	20	35	70	79
	Pasto de corte	Buena	30	58	71	78
Bosque	Mala	45	66	77	83	
	Regular	36	60	73	79	
	Buena	30	55	70	77	
Matorral, mezcla de matorral y herbáceas	Mala	48	67	77	83	
	Regular	35	56	70	77	
	Buena	30	48	65	73	
Mezcla de bosques y hierbas (huertos y árboles frutales)	Mala	57	73	82	86	
	Regular	43	65	76	82	
	Buena	32	58	72	79	
Caminos de tierra	Buena	72	82	87	89	
Caminos pavimentados	Buena	90	90	90	90	

Fuente: (CONAFOR, 2007; TRAGSA, TRAGSATEC y Ministerio de Medio Ambiente, 1998)

Cuadro 9. Condición de humedad antecedente

CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE	PRECIPITACIÓN ACUMULADA DE LOS CINCO DÍAS PREVIOS AL EVENTO (mm)
I Seca	0-12.7
II Húmeda	12.7-38.1
III Mojada o Saturada	>38.1

Fuente: (CONAFOR, 2007)

Cuadro 10. Curva numérica corregida

CN para Condición II	CN Correspondientes a Condición	
	I	III
100	100	100
95	87	98
90	78	96
85	70	94
80	63	91
70	51	85
60	40	78
50	31	70
40	22	60
30	15	50
20	9	37
10	4	22
5	2	13

Fuente: (CONAFOR, 2007)

Cuadro 11. Valores del factor K, en función de la unidad de suelo y textura superficial

Subunidades	Textura			Orden	Textura			Unidades de suelo de la clasificación FAO	
	G	M	F		G	M	F	Nombre	Símbolo
Af	0.026	0.040	0.013	lo	0.026	0.040	0.013	Acrisoles	A
Ag	0.013	0.020	0.007	lp	0.053	0.079	0.026	Cambisoles	B
Ah	0.026	0.030	0.013	lv	0.053	0.079	0.026	Chemozem	C
Ao	0.013	0.020	0.007	M(a,g)	0.026	0.040	0.013	Podzoluvisoles	D
Ap	0.026	0.040	0.013	N(de,e,b)	0.013	0.020	0.007	Rendzinas	E
B	0.053	0.079	0.026	O(d,e,x)	0.013	0.020	0.007	Ferrosoles	F
Bc	0.026	0.040	0.013	P	0.053	0.079	0.026	Gleysoles	G
Bd	0.026	0.040	0.013	Pf	0.053	0.079	0.026	Feozem	H
Be	0.026	0.040	0.013	Pg	0.053	0.079	0.026	Litosoles	I
Bf	0.013	0.020	0.013	Ph	0.026	0.040	0.013	Fluvisoles	J
Bg	0.026	0.040	0.007	Pl	0.026	0.040	0.013	Kastañozem	K
Bh	0.013	0.040	0.013	Po	0.053	0.079	0.026	Luvisoles	L
Bk	0.026	0.040	0.013	Pp	0.053	0.079	0.026	Gipsisoles	M
Bv	0.053	0.079	0.026	Q(a,c,f,l)	0.013	0.020	0.007	Nitosoles	N
Bx	0.053	0.079	0.026	R	0.026	0.040	0.013	Histosoles	O
C(g,h,b,l)	0.013	0.020	0.007	Re	0.026	0.040	0.013	Podzoles	P
D(d,e,g)	0.053	0.079	0.026	Rc	0.013	0.020	0.007	Arenosoles	Q
E	0.013	0.020	0.007	Rd	0.026	0.040	0.013	Regosoles	R
F(a,b,o,p,r)	0.013	0.020	0.007	Rx	0.053	0.079	0.026	Solonetz	S
G	0.026	0.040	0.013	S	0.053	0.079	0.026	Andosoles	T
Gc	0.013	0.020	0.007	Sg	0.053	0.079	0.026	Rankers	U
Gd	0.026	0.040	0.013	Sm	0.026	0.040	0.013	Vertisoles	V
Ge	0.026	0.040	0.013	So	0.053	0.079	0.026	Planosoles	W
Gh	0.013	0.020	0.007	T	0.026	0.040	0.013	Xerosoles	X
Gm	0.013	0.020	0.007	Th	0.013	0.020	0.007	Yermosoles	Y
Gp	0.053	0.079	0.026	Tm	0.013	0.020	0.007	Solonchak	Z
Gx	0.053	0.079	0.026	To	0.026	0.040	0.013		
Gv	0.013	0.079	0.026	Tv	0.026	0.040	0.013		
H(c,g,h,l)	0.013	0.020	0.007	U	0.013	0.020	0.007		
I	0.013	0.020	0.007	V(c,p)	0.053	0.079	0.026		
J	0.026	0.040	0.013	W	0.053	0.079	0.026		
Jc	0.013	0.020	0.007	Wd	0.053	0.079	0.026		
Jd	0.026	0.040	0.013	We	0.053	0.079	0.026		
Ge	0.026	0.040	0.013	Wh	0.026	0.040	0.013		
Gt	0.053	0.079	0.026	Wm	0.026	0.040	0.013		
Jp	0.053	0.079	0.026	Wx	0.053	0.079	0.026		
K(h,k,l)	0.026	0.040	0.013	X(b,h,l,y)	0.053	0.079	0.026		
L	0.026	0.040	0.013	Y(h,k,l,y,t)	0.053	0.079	0.026		
L	0.053	0.079	0.026	Z	0.053	0.040	0.013		
Lc	0.026	0.040	0.013	Zg	0.026	0.040	0.013		
Lf	0.013	0.020	0.007	Zm	0.013	0.020	0.007		
Lg	0.026	0.040	0.013	Zc	0.026	0.040	0.013		
Lk	0.026	0.040	0.013	Zt	0.053	0.079	0.026		

Fuente: FAO-PNUMA, 1980.

Cuadro 12. Exponente asociado al porcentaje de pendiente

Valor del exponente	Porcentaje de pendiente
0.5	> 5
0.4	3-5
0.3	2-3
0.2	1-2
0.1	< 1

Fuente: Wischmeier y Smith 1978.

Cuadro 13. Factor C para bosques

% de cobertura	% cobertura en contacto con el suelo (1)	Tipo de ordenación	
		Control pastoreo	Sin control pastoreo
100-75	100-90	0.001	0.003-0.011
75-40	90-70	0.002-0.003	0.01-0.03
40-20	70-40	0.003-0.009	0.03-0.09

(1) Formada por al menos de restos vegetales o plantas herbáceas

Fuente: Wischmeier y Smith (1978)

Cuadro 14. Factor de C para pastizales, matorral y arbustos

Cubierta vegetal tipo y altura de la cubierta	cubierta en contacto con el suelo %	Tipo	Porcentaje de cobertura del suelo					
			0	20	40	60	80	95-100
Cubierta inapreciable		G	0.45	0.20	0.10	0.04	0.013	0.003
		W	0.45	0.24	0.15	0.09	0.043	0.011
	25	G	0.36	0.17	0.09	0.04	0.012	0.003
		W	0.36	0.20	0.13	0.08	0.041	0.011
Plantas herbáceas y manojos (0.5 m)	50	G	0.26	0.13	0.07	0.04	0.012	0.003
		W	0.26	0.16	0.11	0.08	0.039	0.011
	75	G	0.17	0.10	0.06	0.03	0.011	0.003
		W	0.17	0.12	0.09	0.07	0.038	0.011
	25	G	0.40	0.18	0.09	0.04	0.013	0.003
		W	0.40	0.22	0.14	0.09	0.042	0.110
Matorral (2m)	50	G	0.34	0.16	0.08	0.04	0.012	0.003
		W	0.34	0.19	0.08	0.04	0.012	0.003
	75	G	0.28	0.14	0.08	0.04	0.012	0.003
		W	0.28	0.17	0.12	0.08	0.010	0.011
	25	G	0.42	0.19	0.10	0.04	0.013	0.003
		W	0.42	0.23	0.14	0.09	0.042	0.011
Arbolado sin matorral pequeño apreciable (4m)	50	G	0.39	0.18	0.09	0.04	0.013	0.003
		W	0.39	0.21	0.14	0.09	0.042	0.011
	75	G	0.36	0.17	0.09	0.04	0.012	0.003
		W	0.36	0.20	0.13	0.08	0.041	0.011

G: Cubierta formada por pastizal con al menos 5 cm de humus

W: Cubierta formada por plantas herbáceas con restos vegetales sin descomponer

Fuente: Wischmeier y Smith (1978)

Cuadro 15. Factor C para cultivos

Cultivo y práctica	Media anual del factor C
Suelo desnudo	1.00
Bosque o matorral denso, cultivos con alto porcentaje de mulch	0.001
Sabana o pradera herbáceas o en buenas condiciones	0.01
Sabana o pradera herbáceas sobrepastada	0.1
Maíz, sorgo o mijo: alto rendimiento sin laboreo convencional	0.20-0.55
Maíz, sorgo o mijo: alto rendimiento con laboreo convencional	0.50-0.90
Maíz, sorgo o mijo: alto rendimiento con laboreo mínimo o no laboreo	0.02-0.10
Maíz, sorgo o mijo: alto rendimiento, laboreo con chisel entre residuos	0.12-0.20
Maíz, sorgo o mijo: bajo rendimiento, laboreo con chisel entre residuos	0.30-0.45
Algodón	0.40-0.70
Pradera herbácea	0.01-0.03
soja	0.20-0.50
Trigo	0.10-0.40
Arroz	0.10-0.20
Cacahuete	0.30-0.80
Palmera, cafeto, cocotero con cobertura vegetal	0.10-0.30
Piña cultivada a nivel con retirada de residuos	0.10-0.40
Piña cultivada a nivel con residuos en superficie	0.1
Patata con surcos según la pendiente	0.20-0.50
Patata con surcos transversales a la pendiente	0.10-0.40
Fresa con cobertura de malas hierbas	0.27
Granado con cobertura de malas hierbas	0.08
Granado limpio de malas hieras	0.56
Caña de azúcar	0.13-0.40
Guisante de Angola	0.60-0.70
Pimiento o Cafeto: después de la primera recolección	0.05
Plátano: después de su establecimiento	0.05-0.10
Papaya	0.21

Fuente: Wischmeier y Smith, 1978.

Cuadro 16. Factor P para prácticas mecánicas

Pendiente del terreno (%)	Cultivo al contorno		Cultivo en fajas al contorno y surcos irrigados			Terraceo
	Valor de P	Longitud Máxima (m)	Valor de P	Longitud máxima (m)	Ancho máximo (m)	
1-2	0.60	122	0.30	244.0	40.0	0.12
3-8	0.50	91.5-61	0.25	183-122	30.0	0.10
9-2	0.60	36.6	0.30	73.2	24.4	0.12
13-16	0.70	24.4	0.35	48.8	24.4	0.14
17-20	0.80	18.3	0.40	36.6	18.3	0.16
21-25	0.90	15.2	0.45	30.0	15.2	0.18

Fuente: Wischmeier y Smith, 1978.

Cuadro 17. Estaciones meteorológicas del área de influencia

EDO	CLAVE	ESTACIÓN	Coordenadas		ALTITUD (msnm)
			X	Y	
D.F.	9002	AJUSCO, TLALPAN	-99.200	19.217	2839
D.F.	9004	CALVARIO 61 (TLALPAN)	-99.167	19.283	2270
D.F.	9014	COL. SANTA ÚRSULA COAPA	-99.117	19.300	
D.F.	9022	KM.39.5 A CUERNAVACA	-99.183	19.133	2240
D.F.	9032	MILPA ALTA, MILPA ALTA	-99.017	19.183	2420
D.F.	9034	MOYOGUARDA (XOCHIMILCO)	-99.100	19.283	
D.F.	9037	PRESA ANSALDO, CONTRERAS	-99.217	19.317	
D.F.	9041	SAN FCO. TLALNE.(XOCHI)	-99.117	19.200	
D.F.	9042	SAN GREGORIO AT LAP. XOCH	-99.050	19.250	2259
D.F.	9044	SAN LORENZO (MILPA ALTA)	-99.033	19.183	2222
D.F.	9045	SANTA ANA (MILPA ALTA)	-99.000	19.167	
D.F.	9051	TLAHUAC (XOCHIMILCO)	-99.000	19.017	2240
D.F.	9058	VERTEDOR MILPA ALTA	-99.017	19.183	2455
Méx.	15020	CHALCO, CHALCO	-98.900	19.267	2280
Méx.	15039	JUCHITEPEC, JUCHITEPEC	-98.867	19.100	2860
Méx.	15094	SAN LUIS AMECA,	-98.967	19.183	2450
Méx.	15141	T.AGROP.32 TLALPITZAHUC,	-98.900	19.250	2200
Mex.	15268	IXTAPALUCA, IXTAPALUCA	-98.867	19.317	2620
Mor.	17039	SAN JUAN TLACOTENCO,	-99.100	19.033	2366
Mor.	17049	TEPOZTLAN E-12,TEPOZTLAN	-99.117	18.983	1700

Tabla 3. Variables hidrológicas, período de lluvia. Microcuenca Río Milpa Alta.

Tipo de cobertura	Ia		S		Q		Qp		Y	
	Rango	%	Rango	%	Rango	%	Rango	%	Rango	%
Agricultura	A	35.6	A	35.6	A	14.16	A	8.12	A	73.62
Agroforestal	M	0.6	M	0.6	B	0.01	B	0.01	B	0.00
					M	0.19				
Avena	A	1.3	A	1.3	A	0.94	B	0.02	MA	5.74
Bosque de encino	M	0.9	M	0.1	B	0.05	B	0.05	A	0.15
					M	0.27	M	0.03	B	0.02
									M	0.08
									MA	3.04
Bosque mixto	M	1.9	M	1.9	B	0.27	A	0.05	B	0.00
					M	0.22	B	0.04		
							M	0.01		
Bosque de oyamel	M	0.8	M	0.8	B	0.18	B	0.02	B	0.19
							M	0.02		
Bosque de pino	M	1.5	M	1.5	B	0.24	A	0.04	A	0.37
					M	0.2	B	0.04	B	0.15
							M	0.01	M	0.56
									MA	1.90
Invernaderos	B	0.5	B	0.5	M	0.79	A	0.85		
Matorral inerme	M	0.2	M	0.2	M	0.07	M	0.03	MA	5.88
Nopal	M	6.2	M	6.2	B	1.85	A	5.39	B	5.04
									M	0.73
Otras comunidades vegetales	M	1.9	M	1.9	B	0.01	B	0.02	A	0.49
									B	0.12
									M	1.46
Pastizal	M	2.3	M	2.4	A	0.13	A	0.03	B	0.46
					M	0.86	B	0.09		
							M	0.07		
Urbano	B	46.2	B	47.2	M	79.06	A	85.02		
TOTAL		100		100.2		100		100.0		100

A= Alto

M=Medio

B=Bajo

MA=Muy alto

Retención inicial (Ia), Infiltración potencial (S), Escurrimiento superficial medio (Q), Escurrimiento máximo instantáneo (Qp), Aportación de sedimentos (Y)

Tabla 4. Evaluación de variables hidrológicas por área, Microcuenca Río Milpa Alta.

Tipo de cobertura	<i>Ia-S</i>		<i>Q</i>		<i>Qp</i>		<i>Y</i>	
	Rango	%	Rango	%	Rango	%	Rango	%
Agricultura	A	94	A	92.98	A	39.90	A	90.20
Agroforestal	M	0.13	L M	0.25 0.32	L	0.40	B	0.32
Avena	A	6	A	6.2	L	9.31	MA	26.17
Bosque de encino	M	3.73	L M	0.42 7.34	L M	6.77 11.43	MA A M	15.18 0.80 3.03
Bosque mixto	M	12.33	L M	8.65 22.04	A L M	4.70 8.00 32.03	M	30.68
Bosque de oyamel	M	1.87	L	5.68	L M	2.14 8.77	B	4.70
Bosque de pino	M	26.85	L M	7.8 1.92	A L M	3.90 66.34 6.43	MA A M B	20.36 8.90 1.30 48.20
Invernaderos	L	0.46	M	0.2	A	0.10		
Matorral inerme	M	4.42	M	15.03	M L	32.850 0.001	MA B	38.29 0.00
Nopal	M	47.16	L	59.94	A	40.60	M B	95.40 7.43
Otras comunidades vegetales	M	0.28	L	17.25	L	0.86	A M B	0.12 0.31 0.18
Pastizal	M	3.23	A M	0.83 10.7	A L M	0.08 6.18 8.48	B	8.04
Urbano	L	99.53	M	42.45	A	10.80		

MA= Muy alto A= Alto M=Moderado L= Ligero o bajo
Retención inicial (Ia), Infiltración potencial (S), Esgurrimiento superficial medio (Q), Esgurrimiento máximo instantáneo (Qp), Aportación de sedimentos (Y)

Tabla 5. Clasificación de variables hidrológicas, Microcuenca Río Milpa Alta.

Variable hidrológica	Muy alto	Moderadamente alto	Moderado	Ligero
Retención inicial <i>Ia</i> (mm)		312.00	87.98	50.27
Infiltración potencial <i>S</i> (mm)		3121.18	879.95	502.78
Esgurrimiento medio <i>Q</i> (mm)		407.91	160.06	6.78
Esgurrimiento máximo instantáneo <i>Qp</i> (m ³ /seg)		382.25	207.86	0.04
Sedimentos aportados a una sección del cauce <i>Y</i> (ton/ha/año)	963.46		271.66	10.70

Tabla 6. Variables hidrológicas, Microcuenca Río Cilcuayo

Tipo de cobertura	Ia		S		Q		Qp		Y	
	Rango	%	Rango	%	Rango	%	Rango	%	Rango	%
Agricultura	A	18.9	A	18.9	A	16.02	A	80.41	MA	76.46
Agroforestal	M	35.2	M	35.2	A	3.61	B	1.01	B	0.08
					M	15.63				
Avena	M	0.3	M	0.3	A	0.71	M	0.46	MA	3.50
Bosque de encino	M	2.2	M	2.2	M	1.14	B	0.81	A	1.48
							M	0.37	B	0.38
Bosque mixto	M	3.8	M	3.8	M	1.88	B	0.64	A	0.37
							M	0.40	B	0.43
Bosque de oyamel	M	4.4	M	4.4	M	1.91	B	0.86	B	0.36
							M	0.57		
Bosque de pino	M	4.9	M	4.9	A	0.38	B	0.4	A	0.21
					B	0.04	M	1.52	B	0.36
					M	1.8			M	0.19
Hortalizas-flores	A	1.8	A	1.8	A	1.17	B	0.11	MA	11.14
							M	0.25		
Matorral inerme	M	3.6	M	3.6	M	1.87	B	0.71	A	1.45
							M	0.58	B	0.46
Nopal	M	2.7	M	2.7	A	1.71	B	0.44	A	1.33
							M	0.56	B	0.39
Otras comunidades vegetales	M	0.3	M	0.3	M	0.13	B	0.02	B	0.03
Pastizal	M	8.6	M	8.6	A	5.07	B	1.78	B	1.37
Urbano	B	13.3	B	13.3	A	46.93	B	8.11		
TOTAL		100		100		100		100		100.0

A=Alto M=Medio B=Bajo MA=Muy alto

Retención inicial (Ia), Infiltración potencial (S), E scorrimiento superficial medio (Q), E scorrimiento máximo instantáneo (Qp), Aportación de sedimentos (Y)

Tabla 7. Variables hidrológicas por área, Microcuenca Río Cilcuayo.

Tipo de cobertura	<i>Ia-S</i>		<i>Q</i>		<i>Qp</i>		<i>Y</i>	
	Rango	%	Rango	%	Rango	%	Rango	%
Agricultura	A	98.32	A	69.43	A	100.0	MA	96.63
Agroforestal	M	50.01	A	0.69	B	5.73	L	6.82
			M	1.44				
Avena	M	0.23	A	0.99	M	0.62	MA	1.38
Bosque de encino	M	5.22	M	12.04	M	2.15	A	16.13
					B	32.24	L	18.17
Bosque mixto	M	3.59	M	8.29	M	7.90	A	15.32
					B	4.54	L	5.42
Bosque de oyamel	M	2.82	M	6.52	M	3.06	L	24.54
					B	12.22		
Bosque de pino	M	21.09	A	0.21	M	52.82	A	0.26
			M	46.78	B	9.2	M	100
			B	100			L	10.95
Hortalizas-flores	A	1.38	A	1.18	M	0.62	MA	1.38
					B	0.33	L	1.98
Matorral inerme	M	10.76	M	24.85	M	26.32	A	52.21
					B	6.39	L	5.54
Nopal	M	3.27	A	13.9	M	6.50	A	15.61
					B	6.05	L	2.13
Otras comunidades vegetales	M	0.31	M	0.072	B	0.23	L	0.27
Pastizal	M	2.96	A	12.67	B	21.66	L	25.75
Urbano	B	100	A	0.85	B	1.40		

MA=Muy alto

A=Alto

M=Moderado (medio)

L=ligero (Bajo)

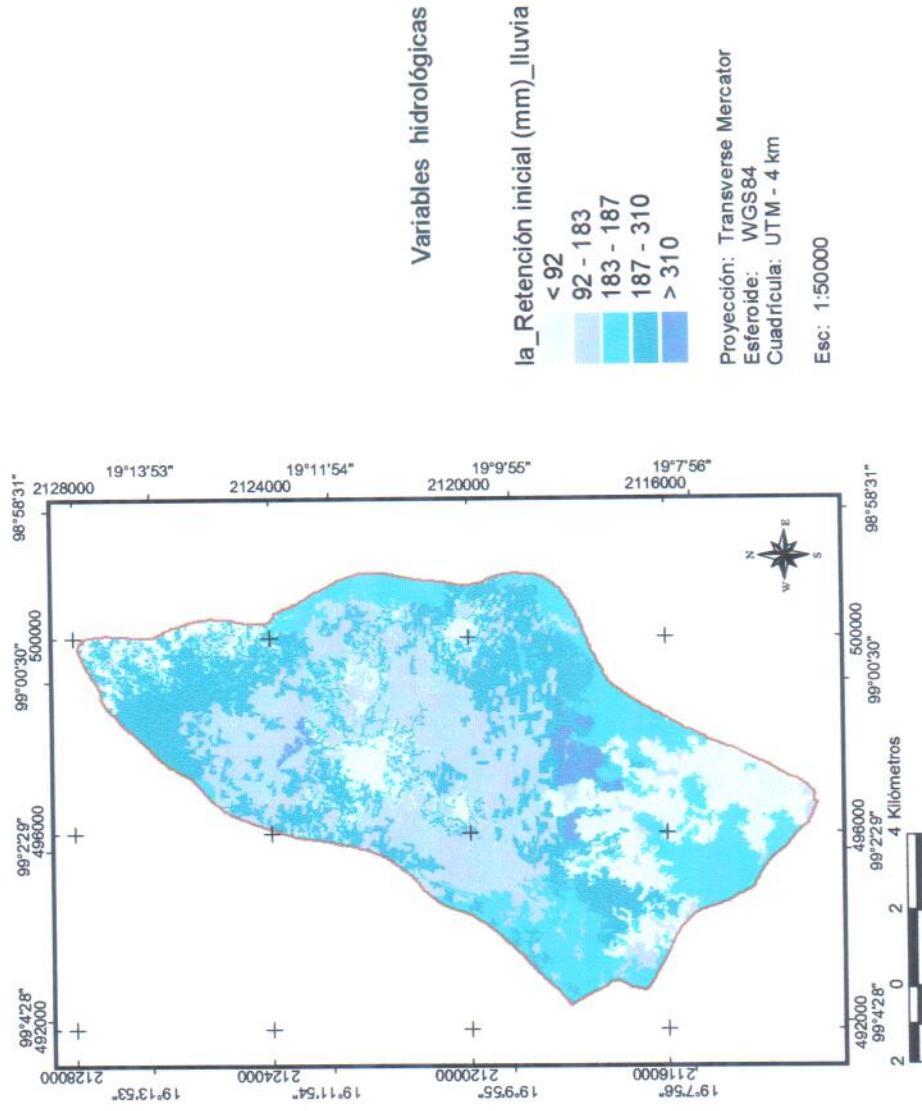
Retención inicial (Ia), Infiltración potencial (S), Escurrimiento superficial medio (Q), Escurrimiento máximo instantáneo (Qp), Aportación de sedimentos (Y)

Tabla 8. Clasificación de variables hidrológicas, Microcuenca Río Cilcuayo.

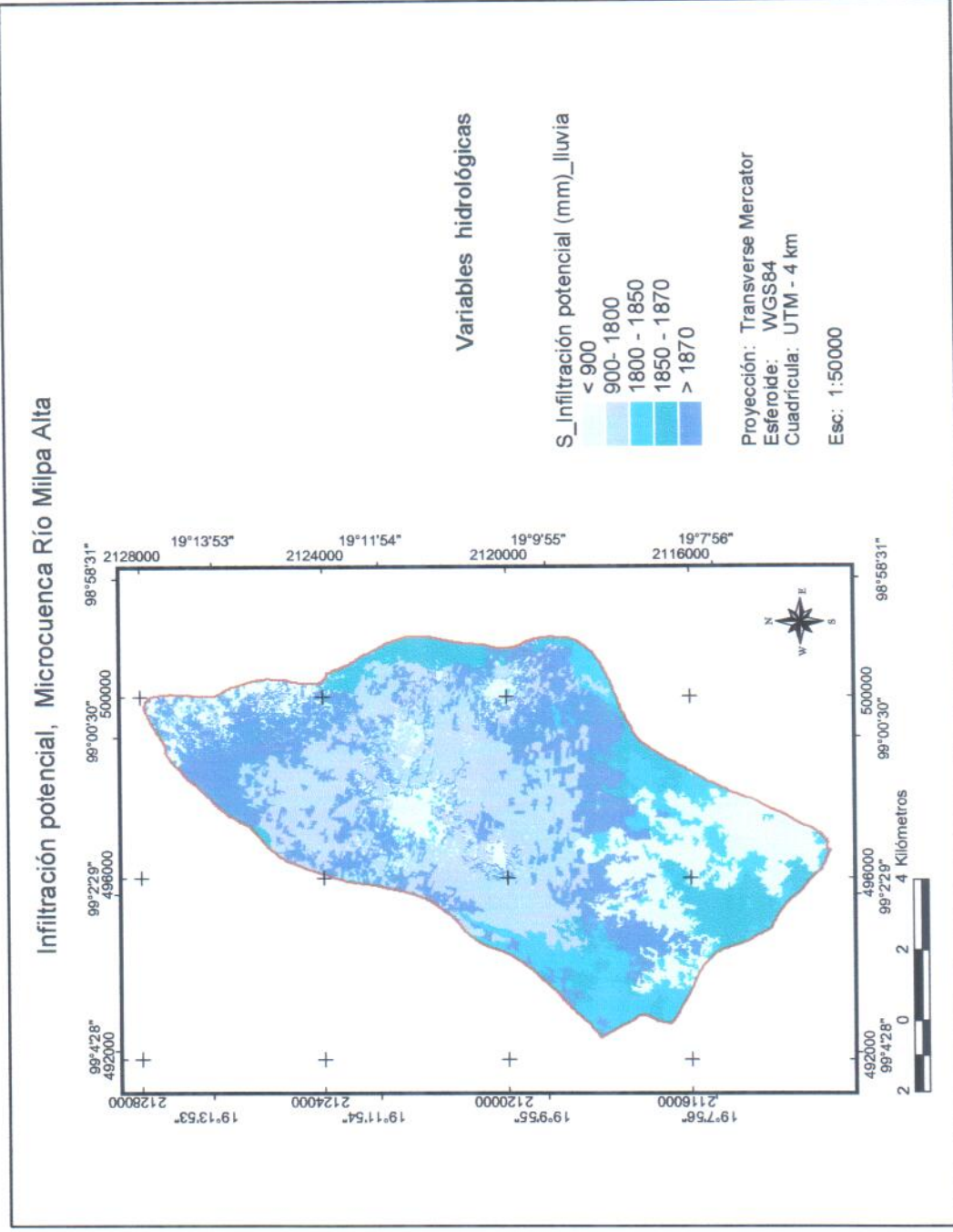
Variable hidrológica	Muy alto	Moderadamente alto	Moderado	Ligero
Retención inicial <i>Ia</i> (mm)		312.117	145.31	50.27
Infiltración potencial <i>S</i> (mm)		3121.175	1453.13	502.77
Escurrimiento medio <i>Q</i> (mm)		407.91	193.5	21.0
Escurrimiento máximo instantáneo <i>Qp</i> (m ³ /seg)		653.10	289.00	75.0
Sedimentos aportados a una sección del cauce <i>Y</i> (ton/ha/año)	842.48		200.07	7.92

Carta 1:

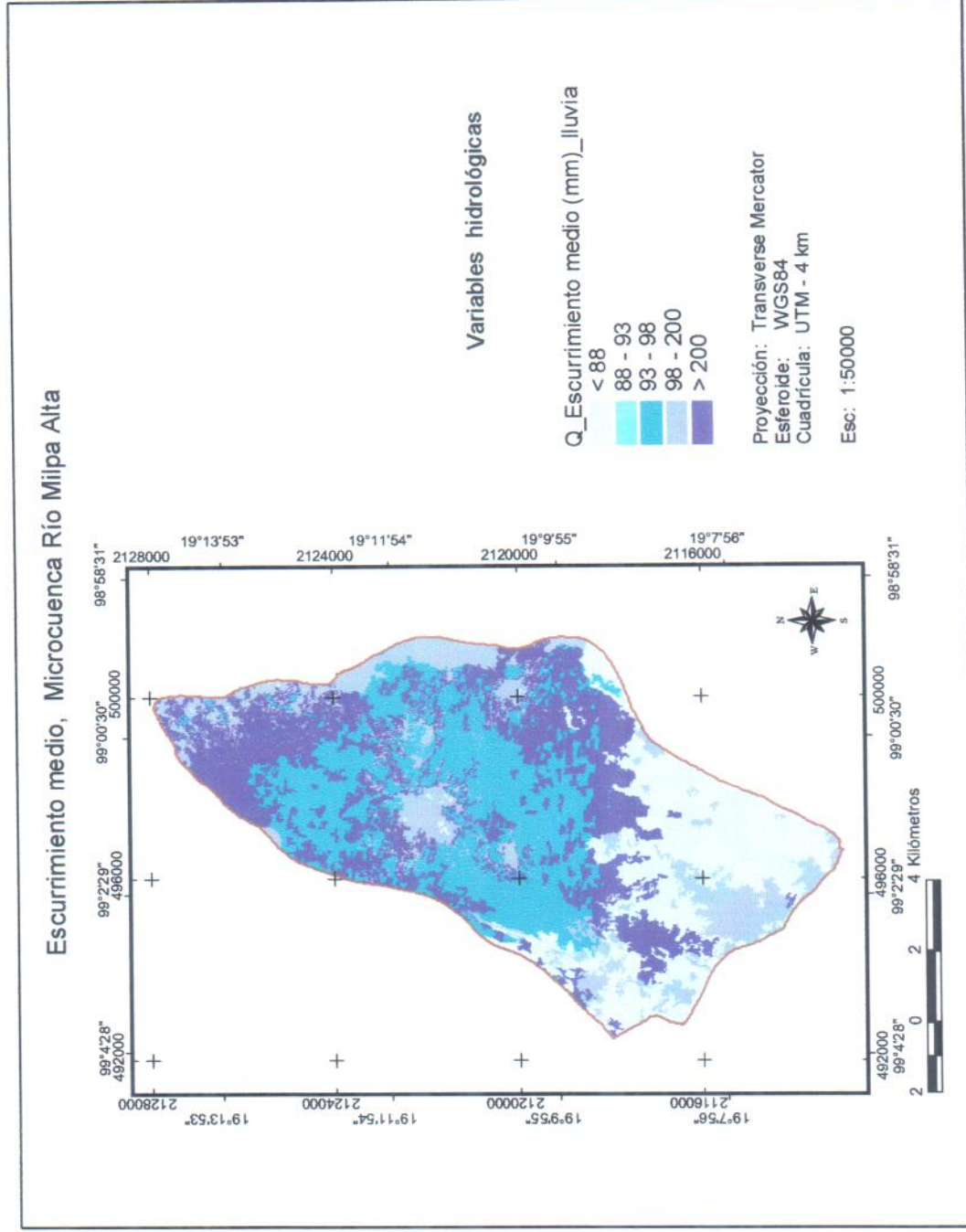
Retención inicial, Microcuenca Río Milpa Alta



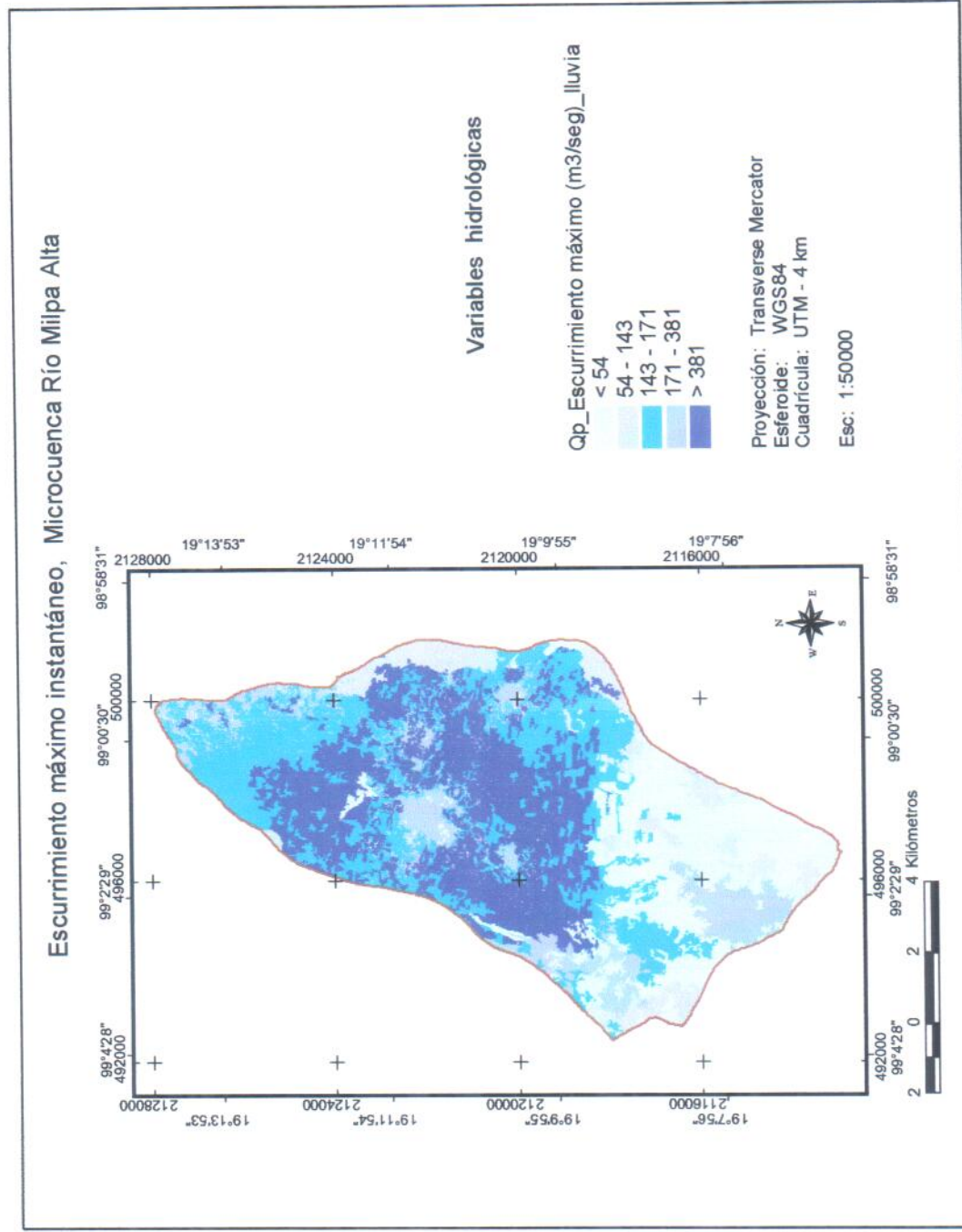
Carta 2.



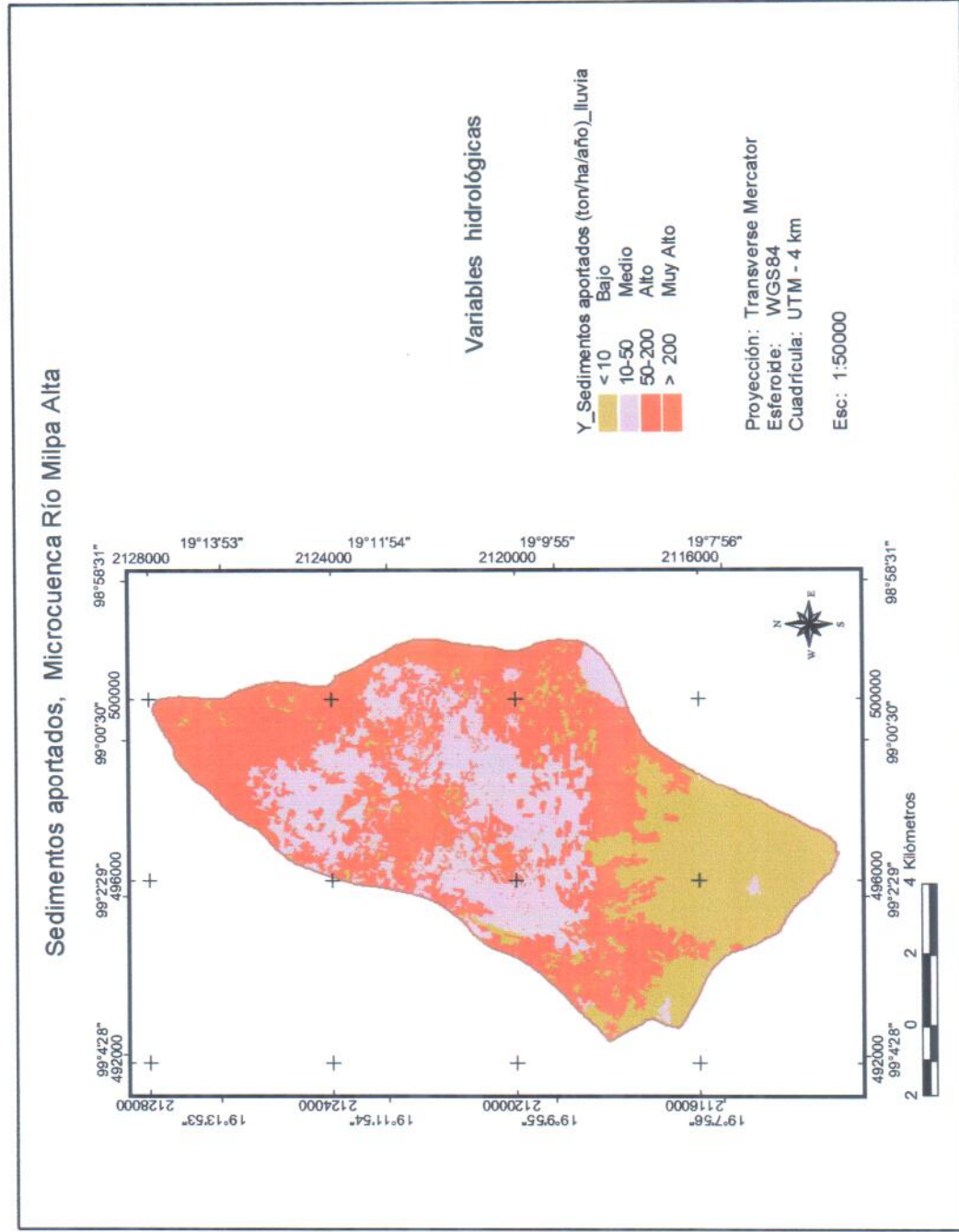
Carta 3.



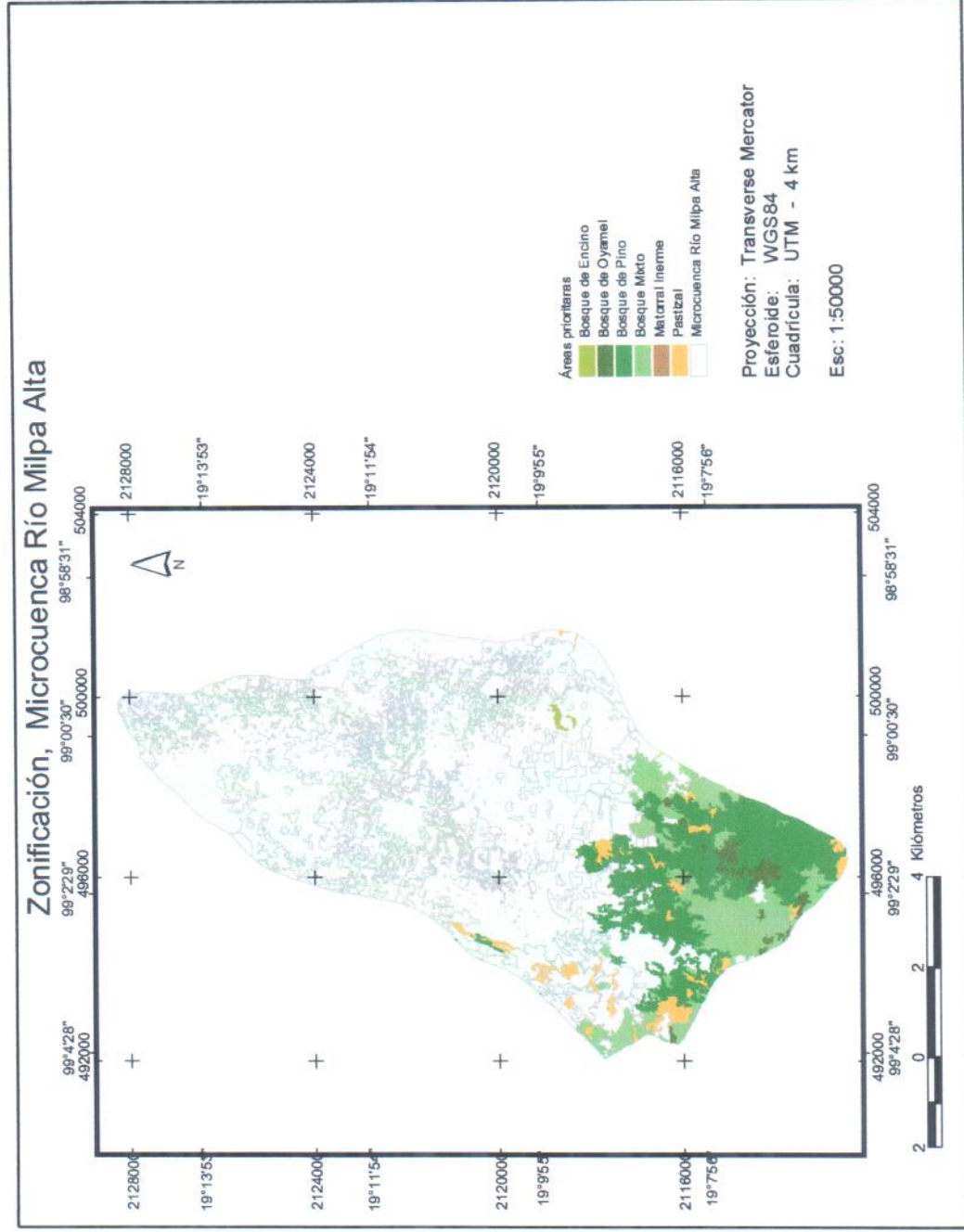
Carta 4.



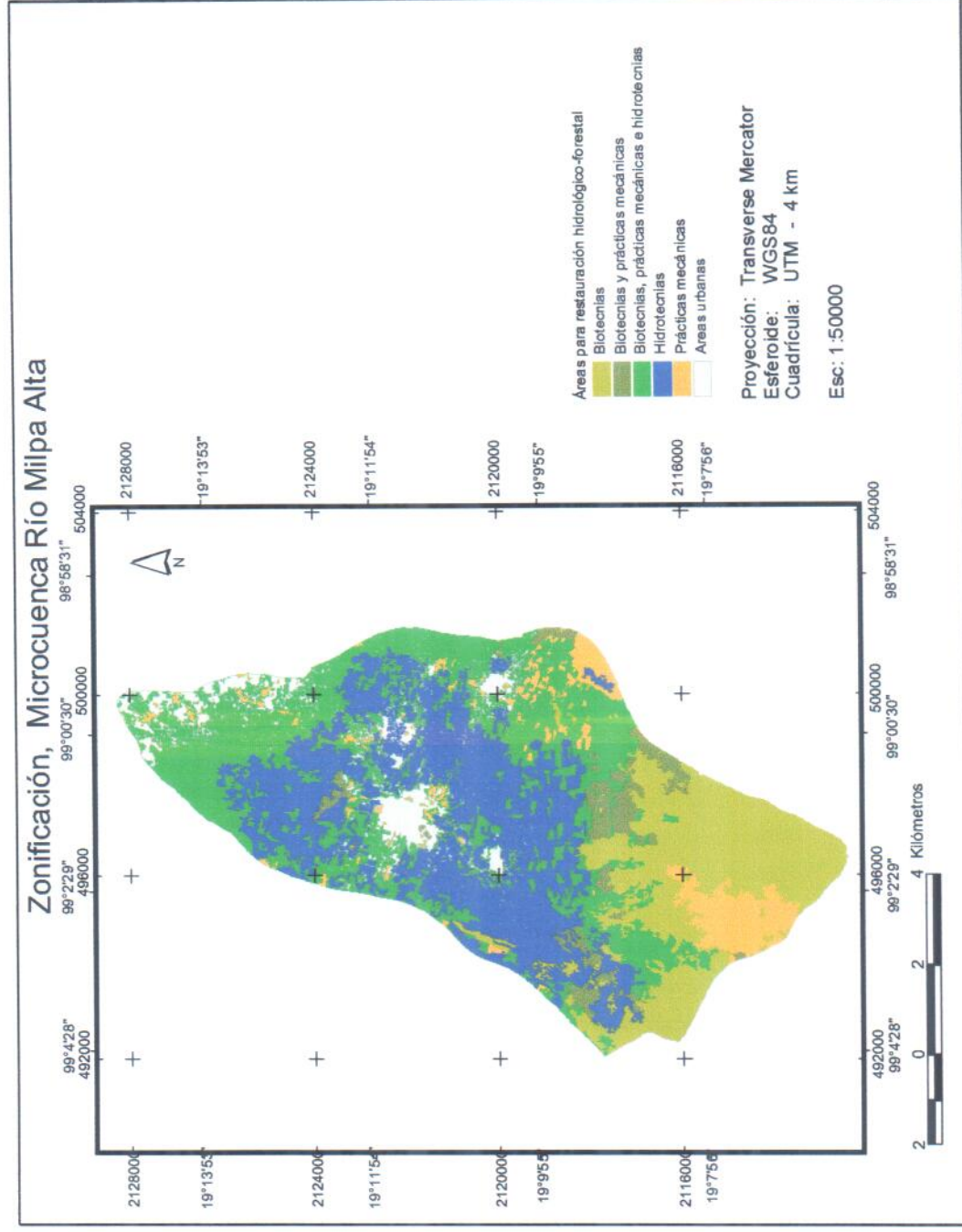
Carta 5.



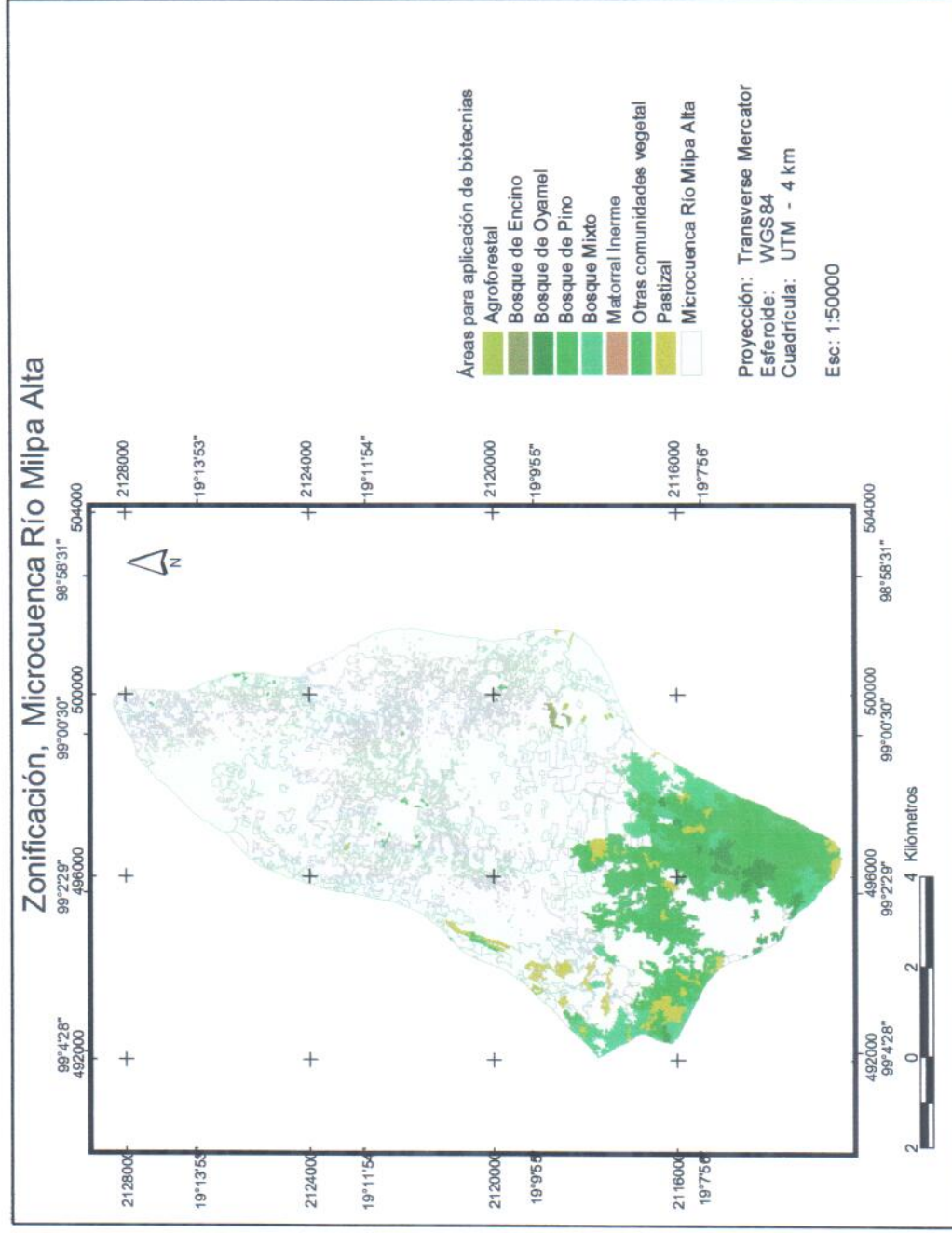
Carta 6.



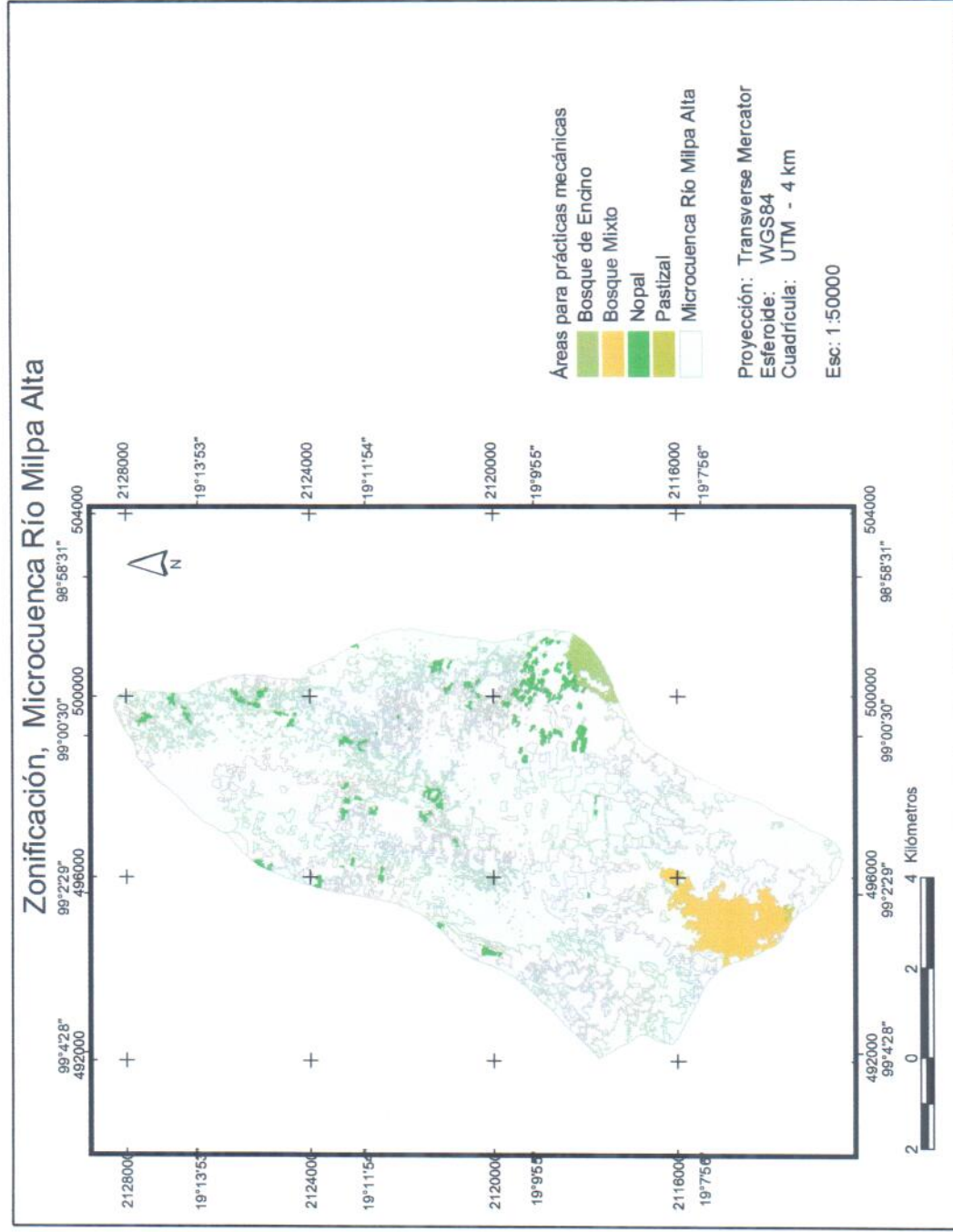
Carta 7.



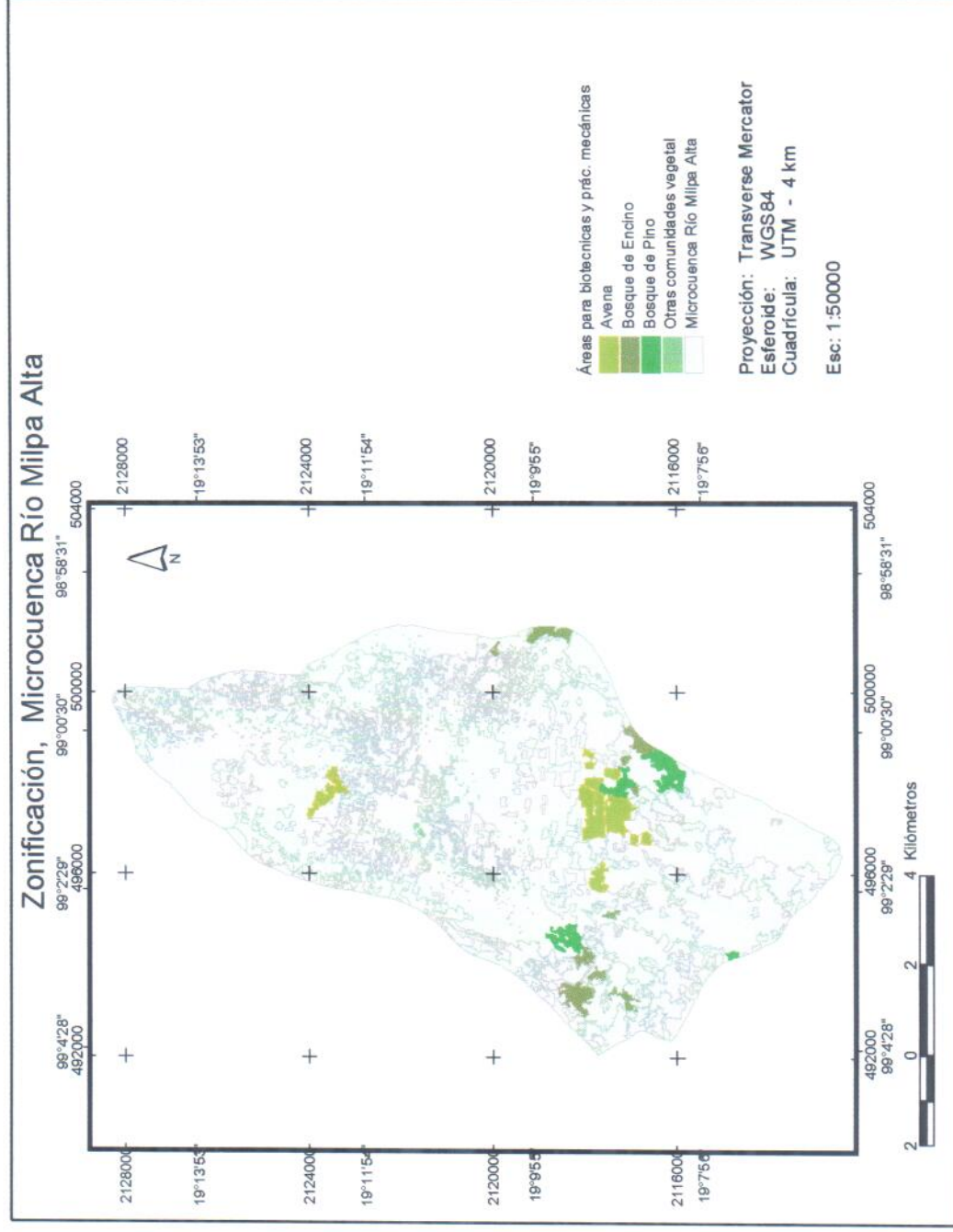
Carta 8.



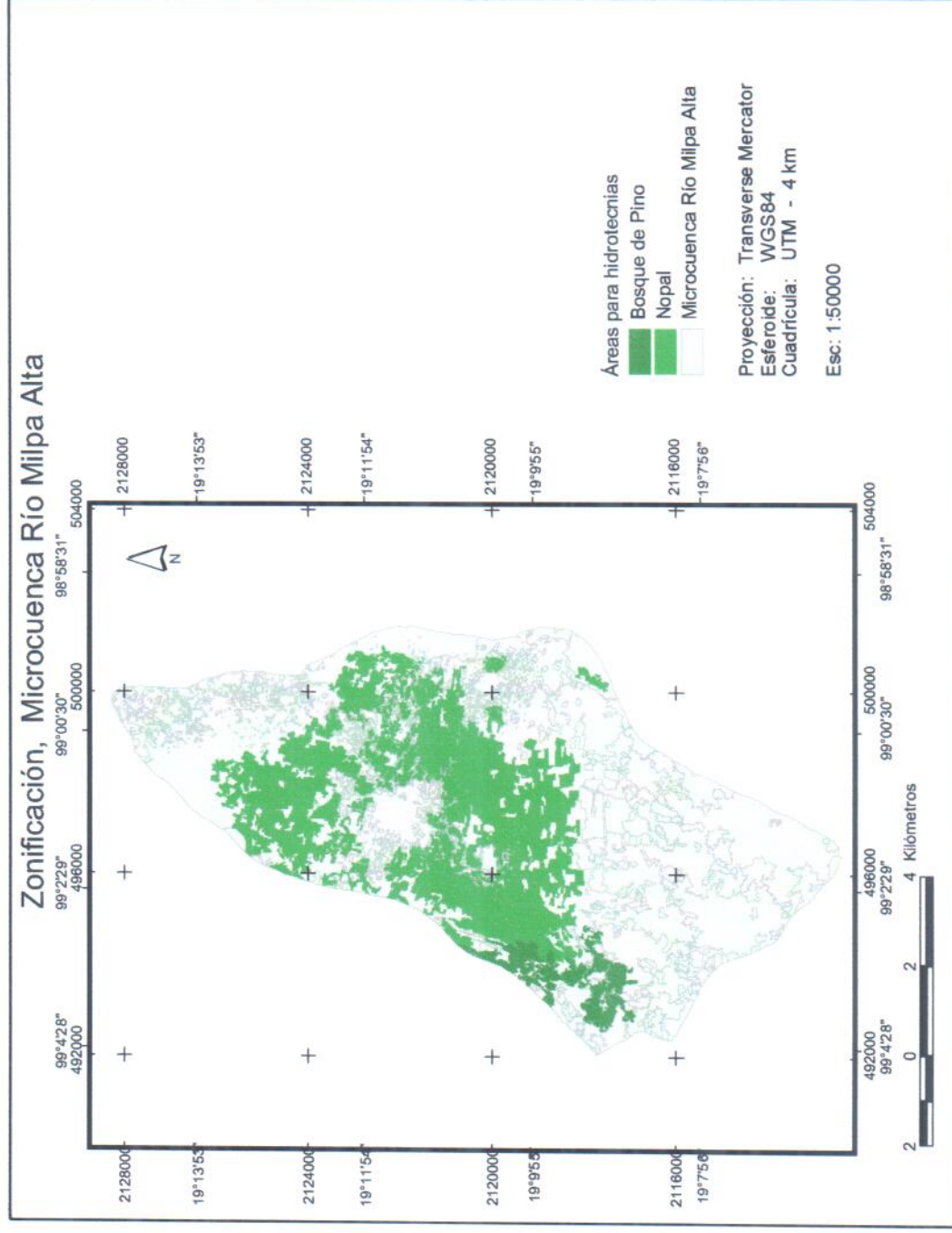
Carta 9.



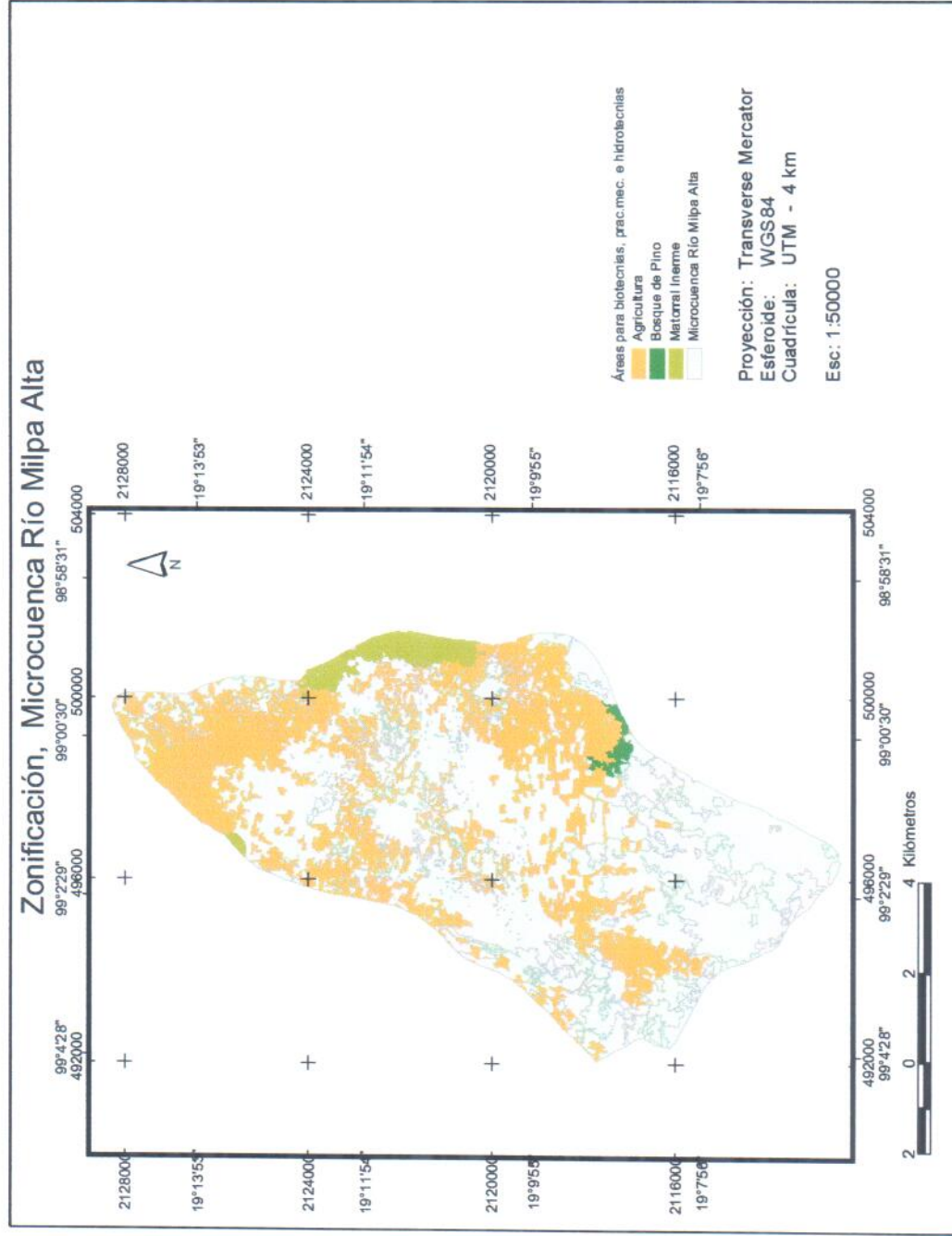
Carta 10.



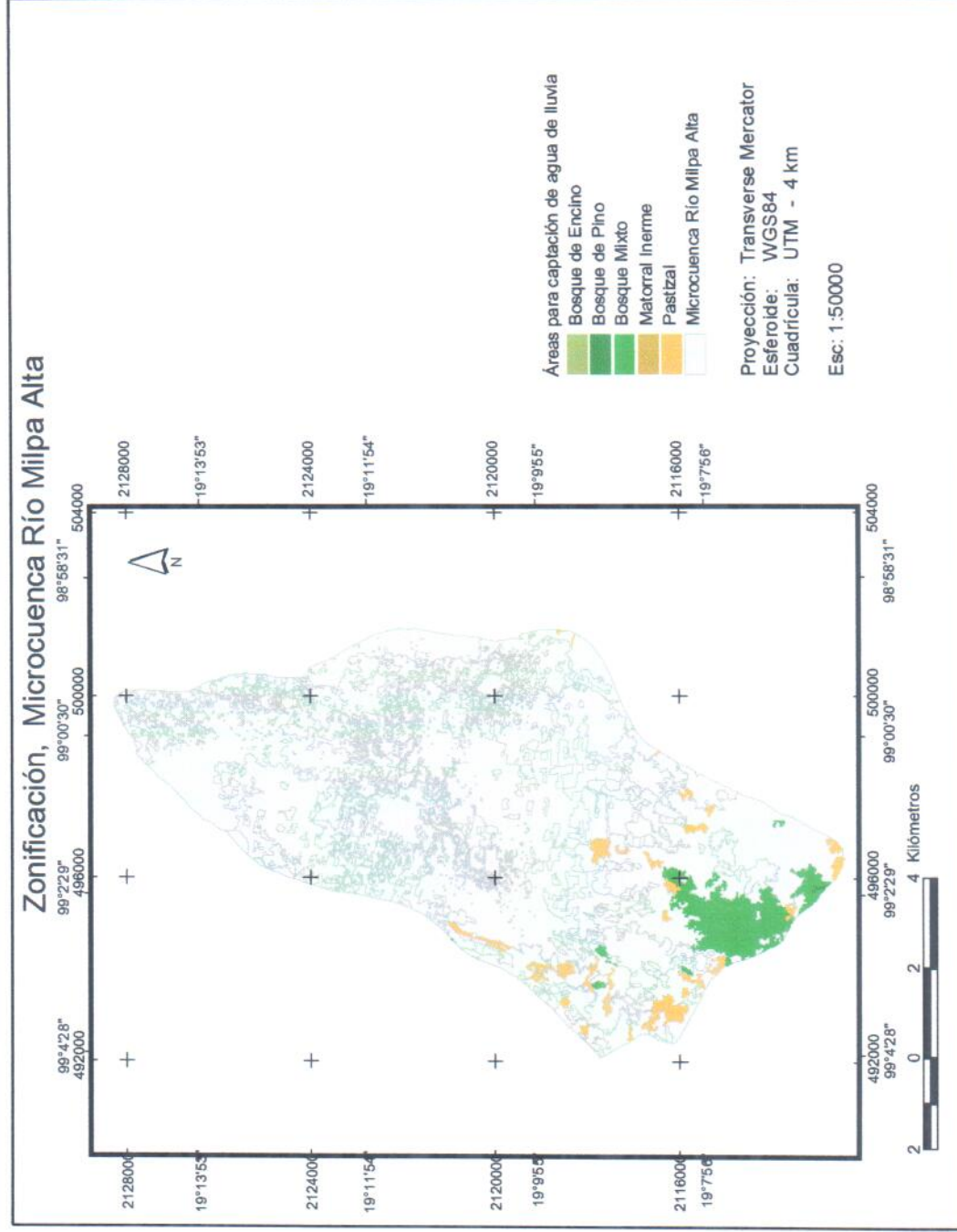
Carta 11.



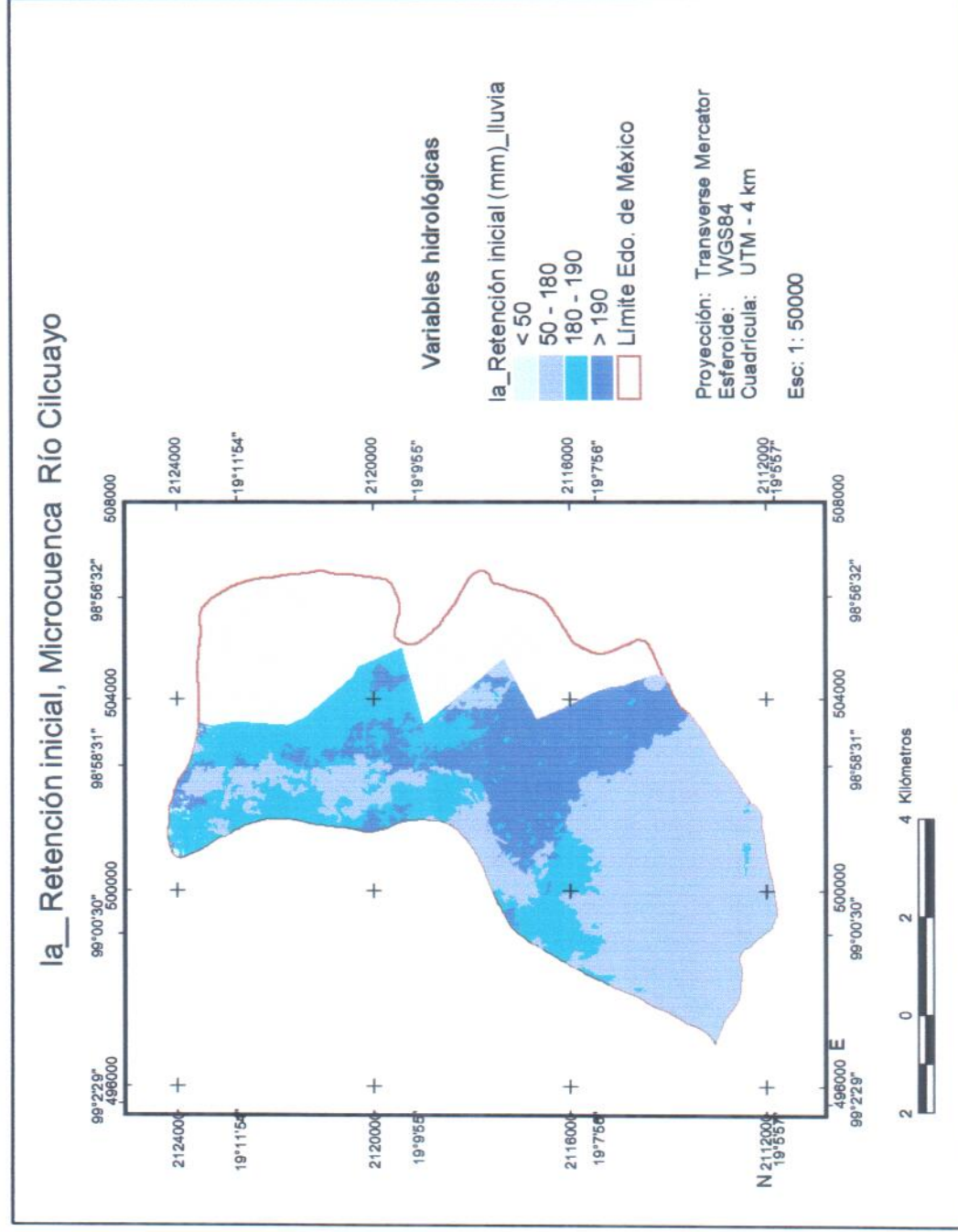
Carta 12.



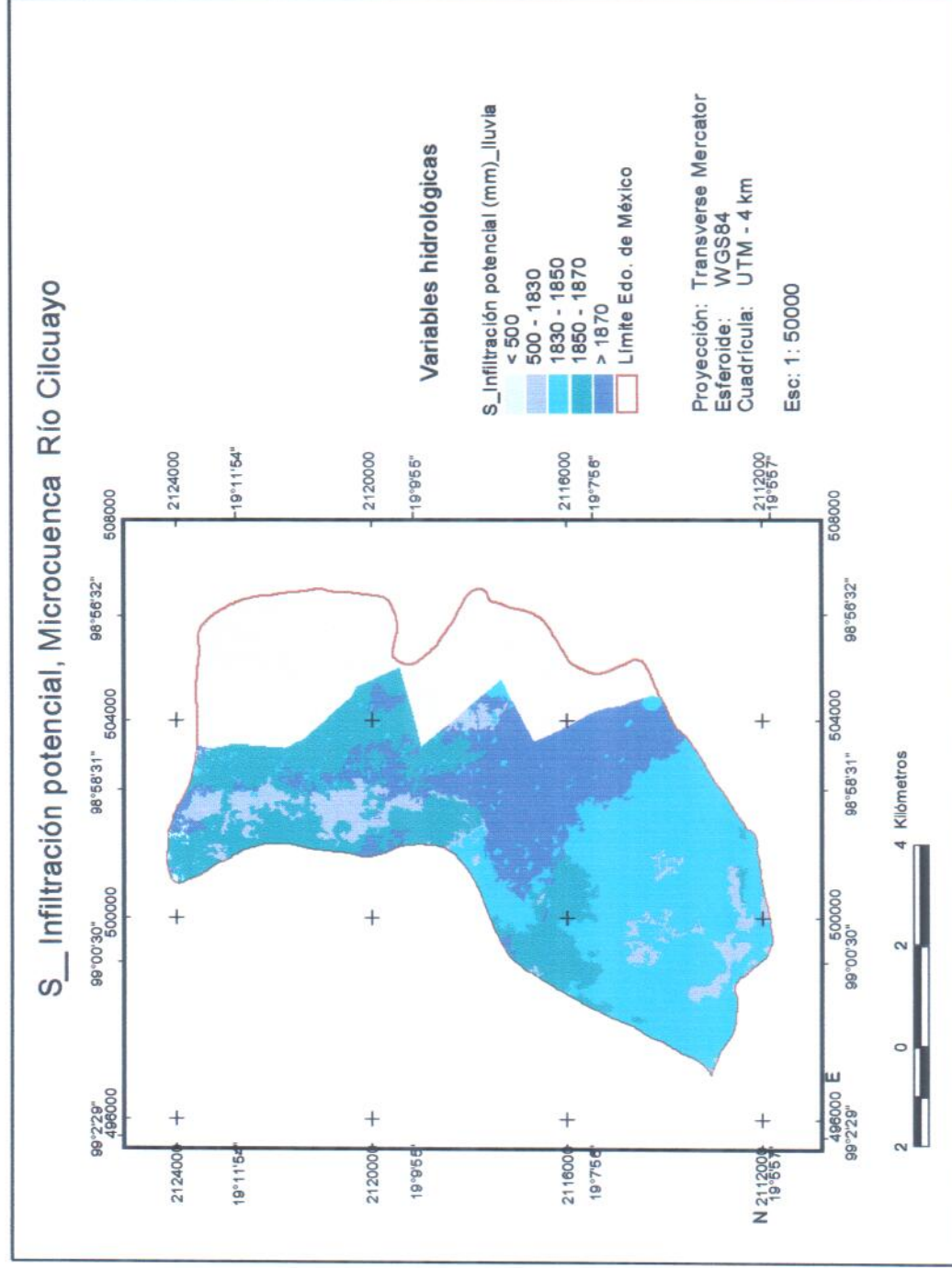
Carta 13.



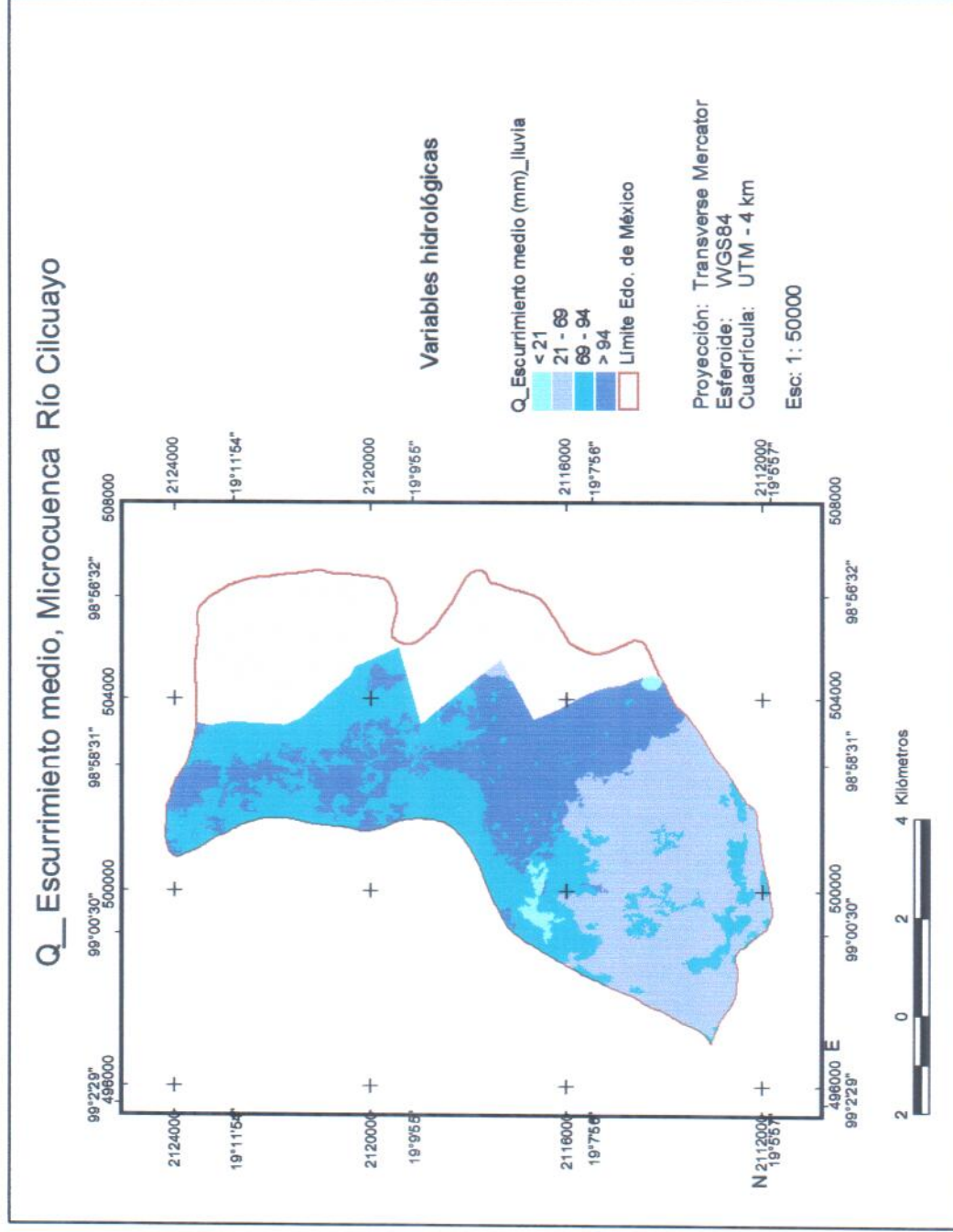
Carta 14.



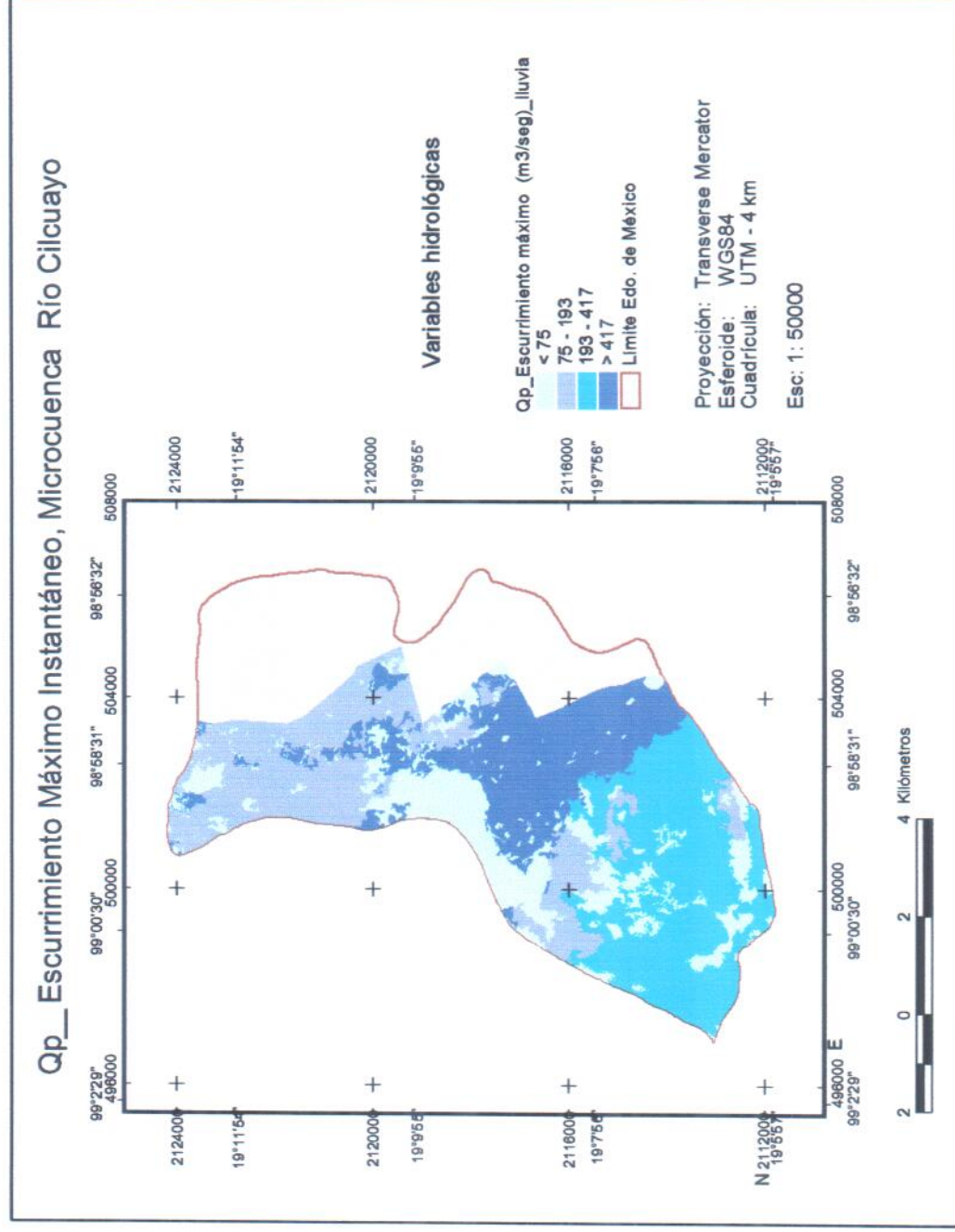
Carta 15.



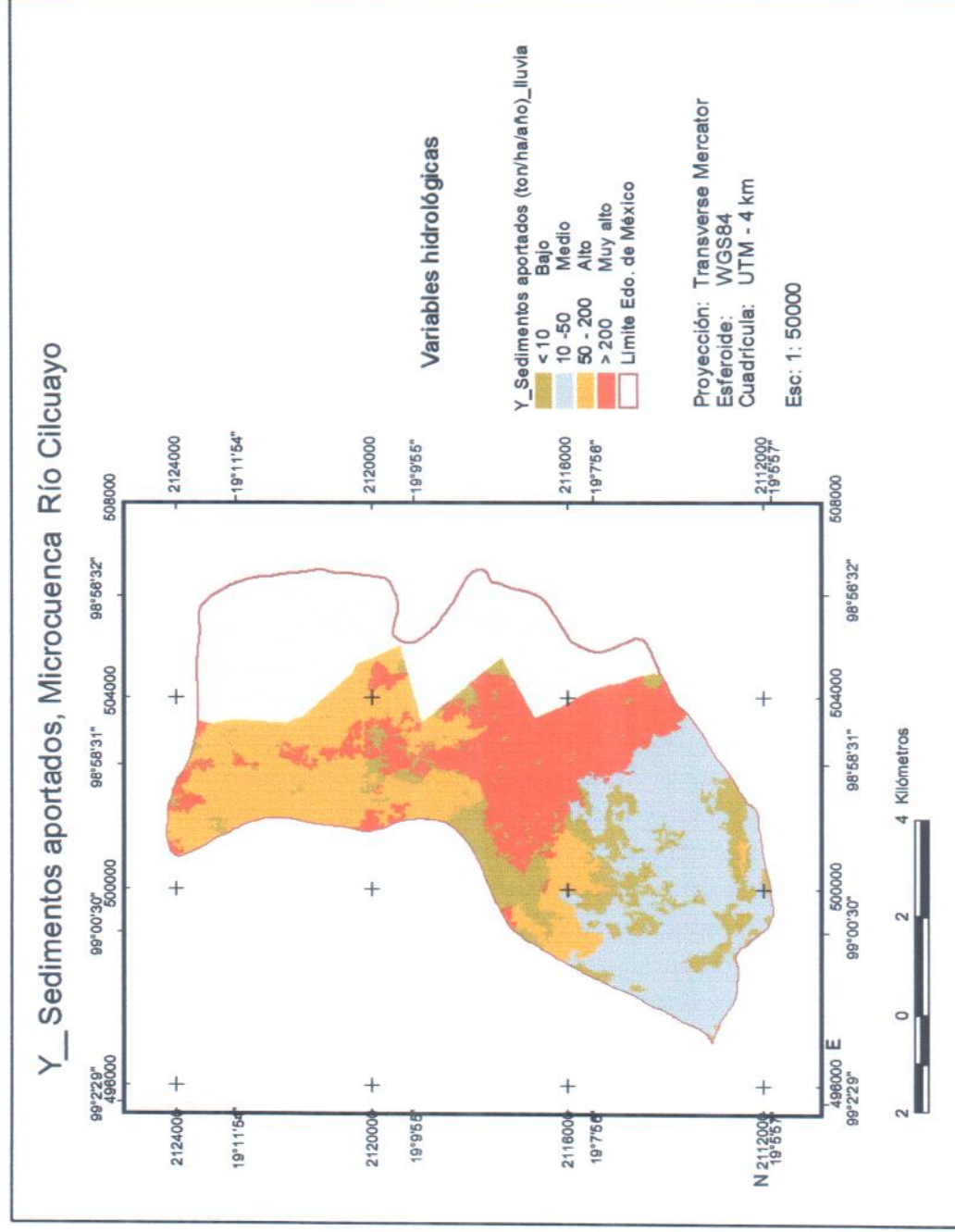
Carta 16.



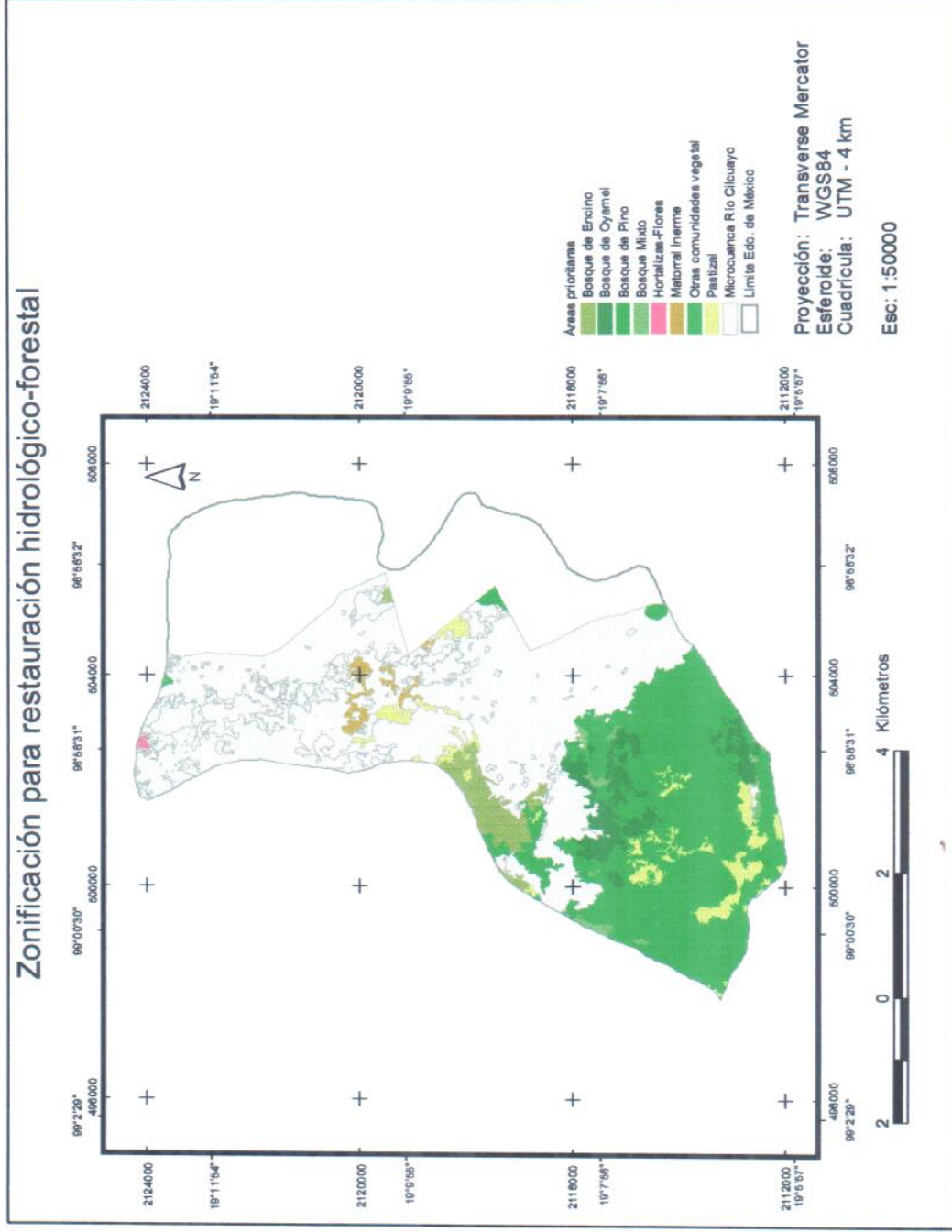
Carta 17.



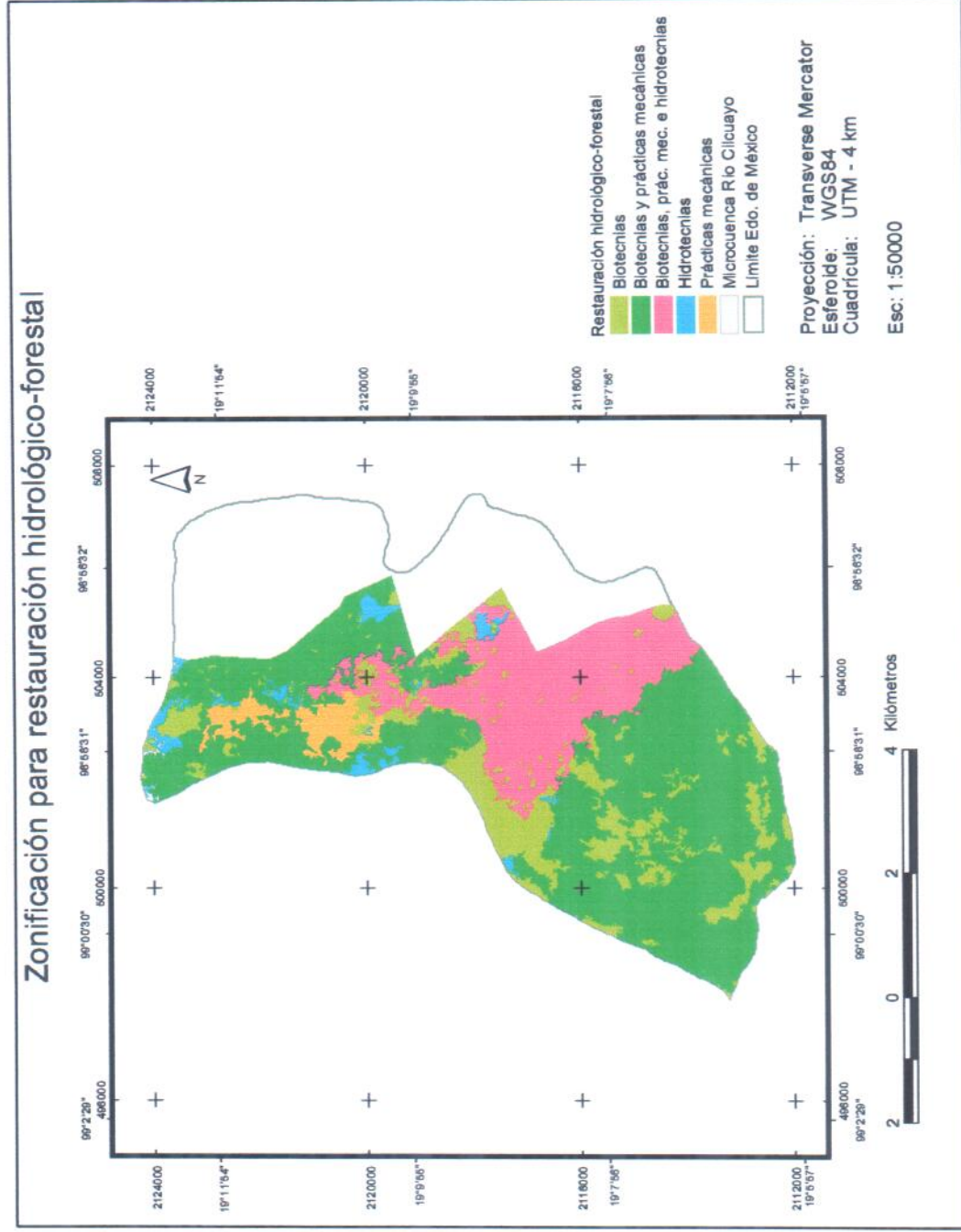
Carta 18.



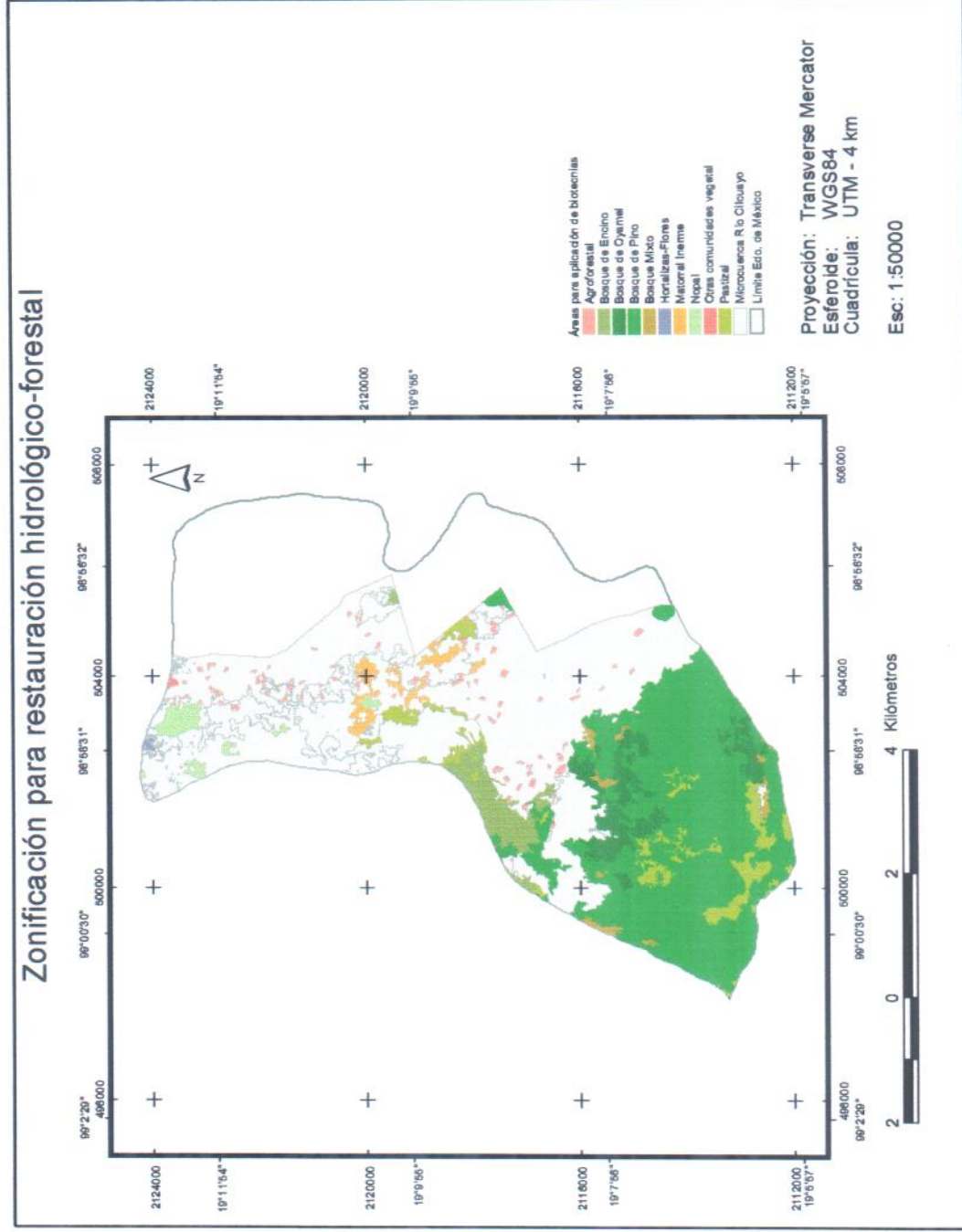
Carta 19.



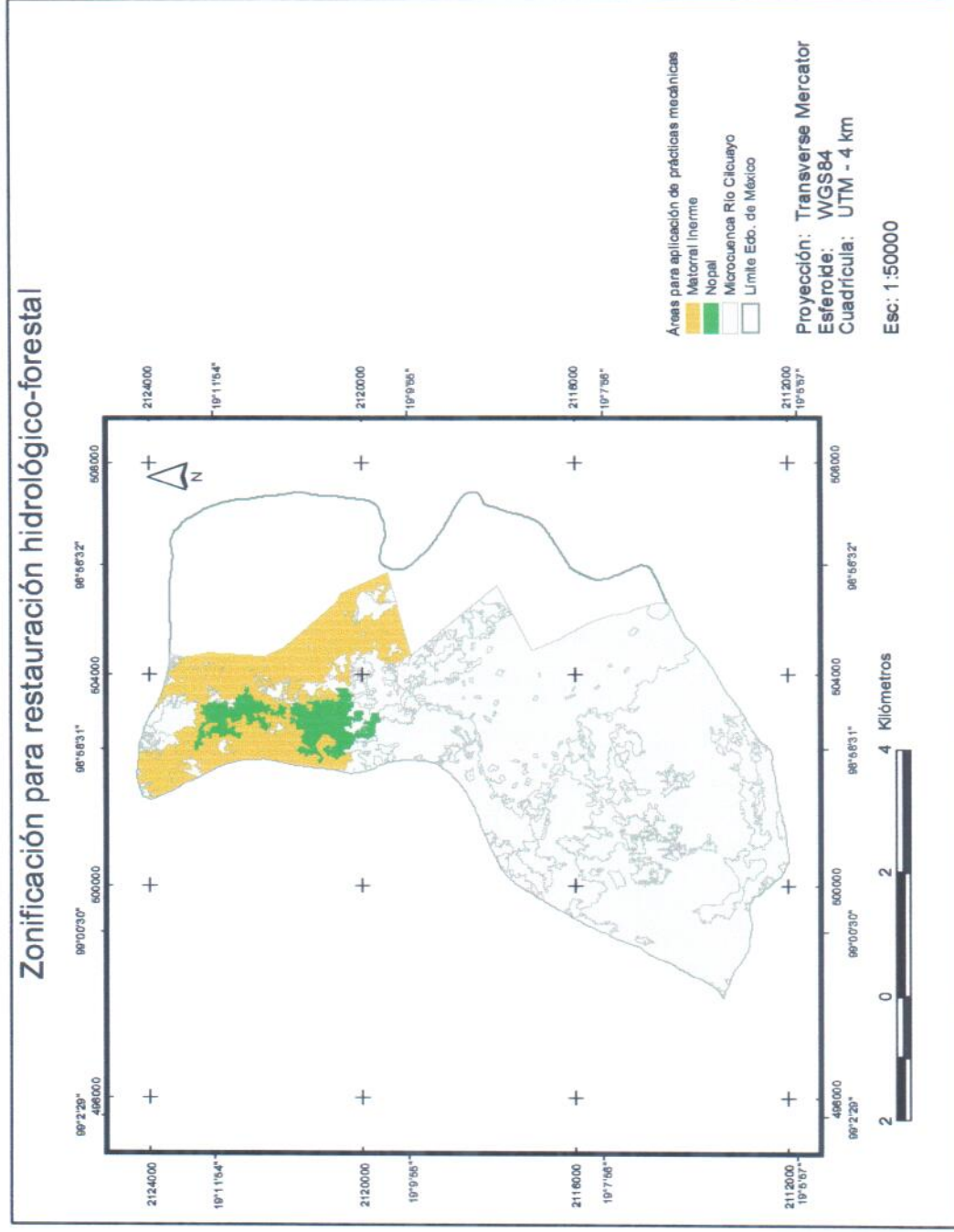
Carta 20.



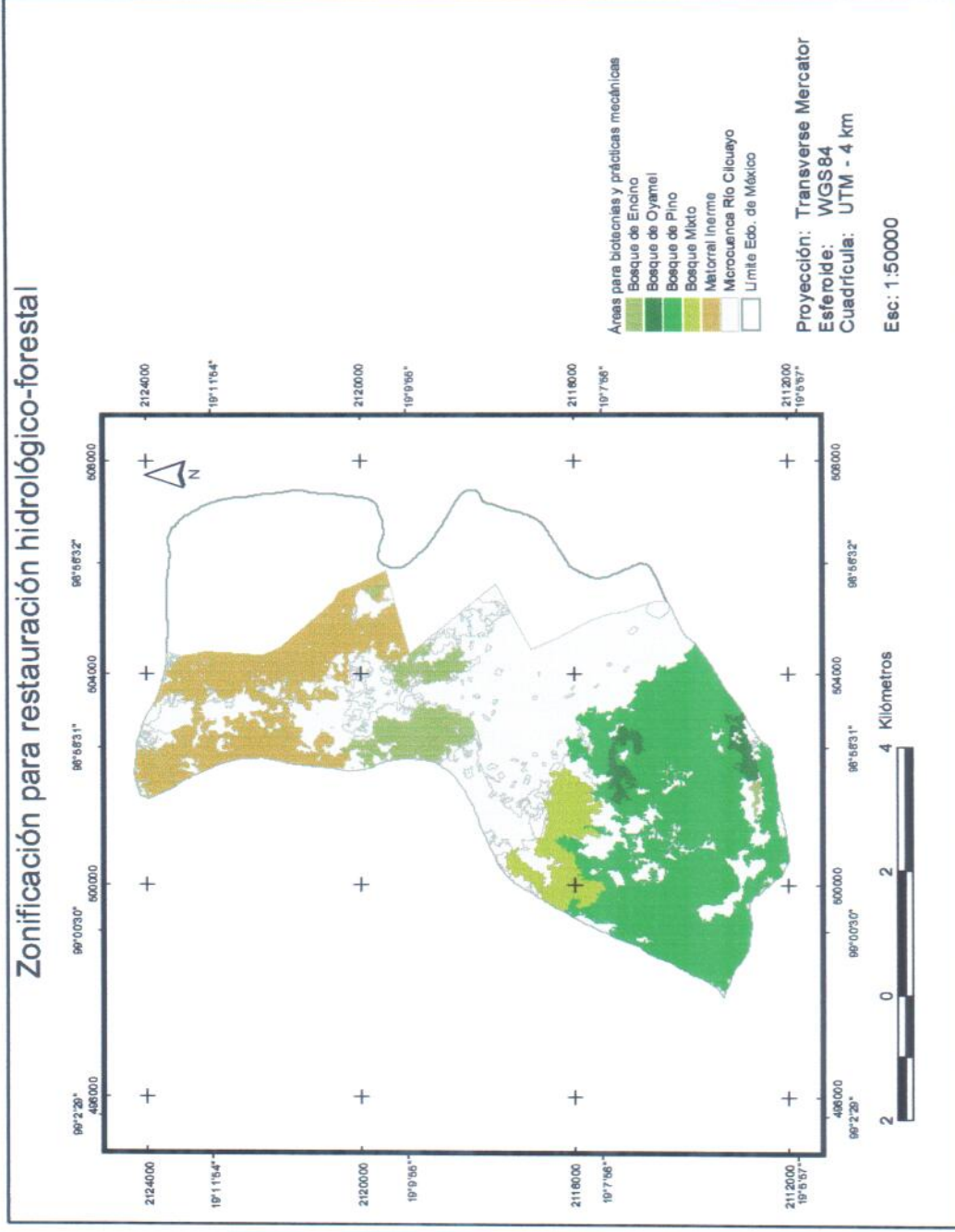
Carta 21.



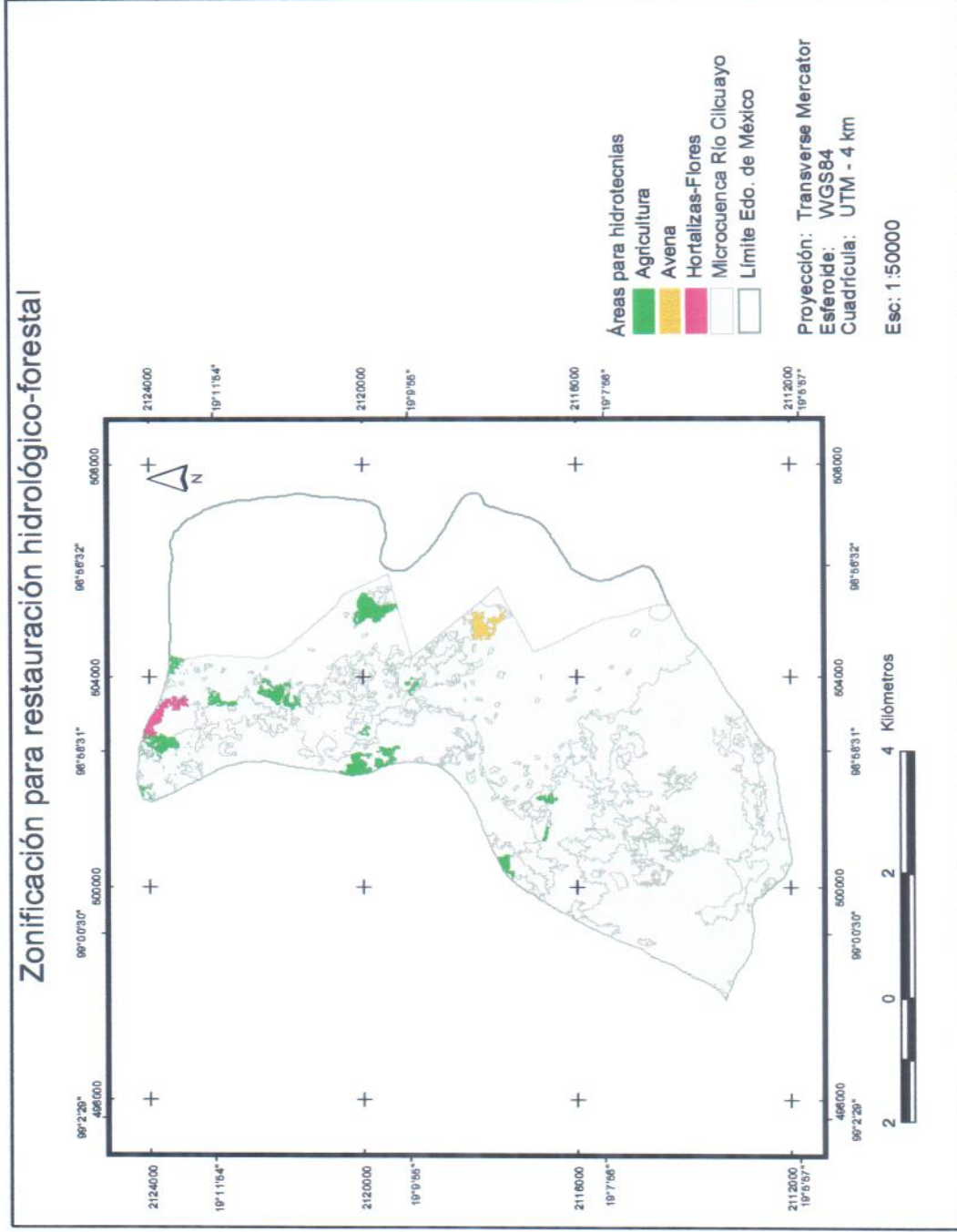
Carta 22.



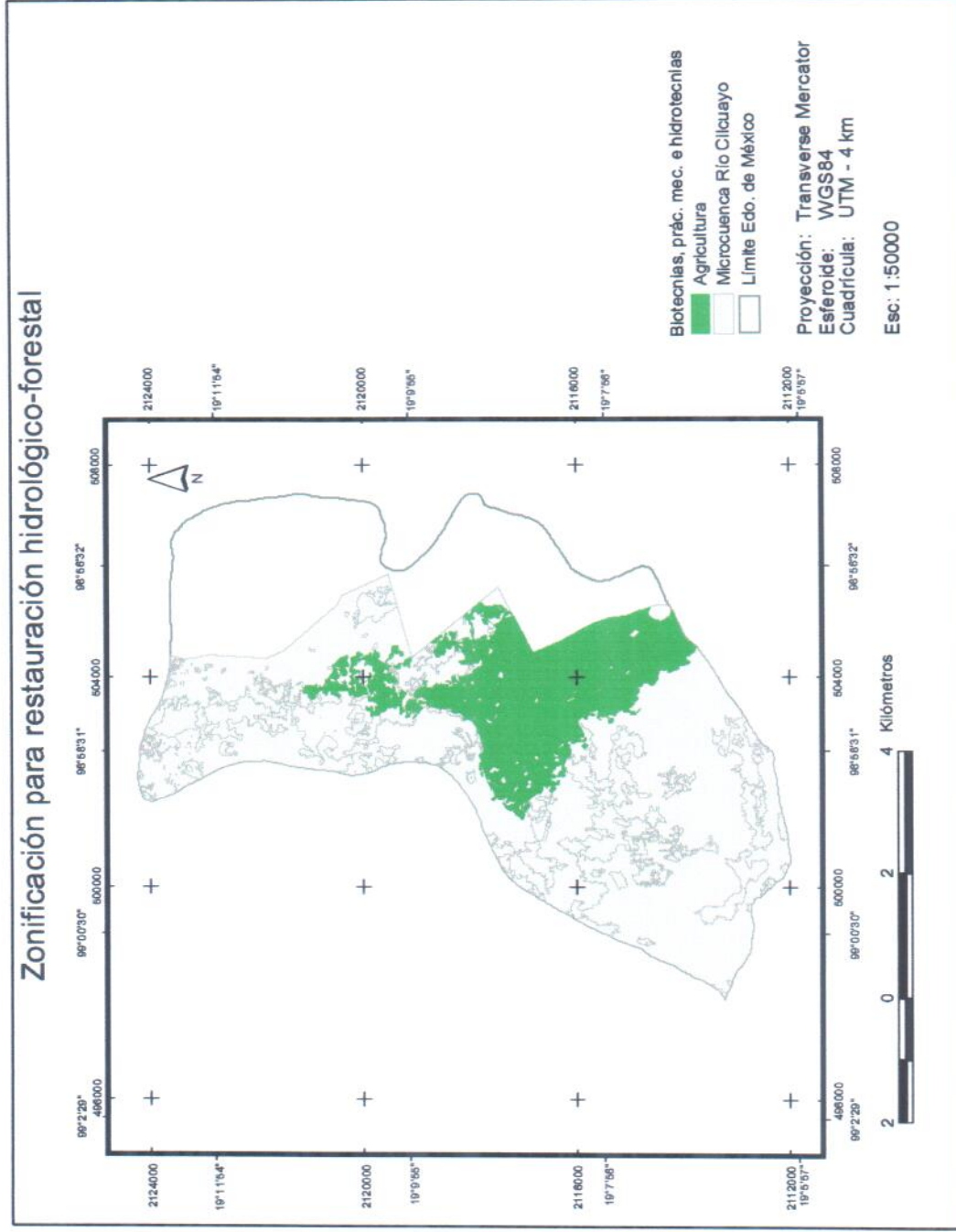
Carta 23.



Carta 24.



Carta 25.



Carta 26.

