

# UNIVERSIDAD DEL MAR

CAMPUS PUERTO ESCONDIDO



ESTABLECIMIENTO DE UN SISTEMA AGROFORESTAL CON DOS ESPECIES LEGUMINOSAS  
PARA LA RECUPERACIÓN DE SUELOS DEGRADADOS EN LA MICRO-CUENCA DE SAN PEDRO  
MIXTEPEC, JUQUILA, OAXACA.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE LICENCIADO EN INGENIERÍA FORESTAL

PRESENTA

DAVID SARMIENTO BUSTOS

DIRECTOR DE TESIS

DR. EDGAR IVÁN SÁNCHEZ BERNAL

PUERTO ESCONDIDO, OAXACA, MÉXICO; SEPTIEMBRE DEL 2008

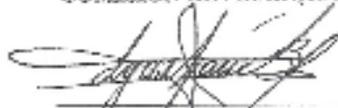
## UNIVERSIDAD DEL MAR



### ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

Después de realizar una revisión detallada de la tesis "Establecimiento de un Sistema Agroforestal con dos especies leguminosas para la recuperación de Suelos degradados en la Micro-cuenca de San Pedro Mixtepec, Juquila, Oaxaca.", presentada por el pasante de la Licenciatura en Ingeniería Forestal David Sarmiento Bustos, se considera que cumple con los requisitos y la calidad necesarios para ser defendida en el examen profesional.

#### COMISIÓN REVISADORA

  
Dr. Edgar Iván Sánchez Bernal  
Universidad del Mar  
Director

  
Dr. Eustacio Ramírez Fuentes  
Universidad del Mar  
Revisor

  
M. en C. Verónica Ortega Baranda  
Universidad del Mar  
Revisor

  
M. en C. Francisco Domínguez H.  
Universidad del Mar  
Revisor

  
Ing. Gelia Sandoval Orozco  
Universidad del Mar  
Revisor



## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, a mi familia, maestros, director de tesis, comisión revisadora, amigos, compañeros y a todos los que directa e indirectamente colaboraron para culminar la primera etapa de mi carrera profesional y para la realización de este trabajo...

Gracias por su apoyo.

## INDICE GENERAL

	<b>Página</b>
ÍNDICE DE TABLAS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
RESUMEN	vi
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
3. HIPÓTESIS	3
4. REVISIÓN DE LITERATURA	4
4.1. Características pedogenéticas y físico-químicas del suelo.	4
4.1.1. Definición.	4
4.1.2. Propiedades físicas del suelo.	5
4.1.2.1. Textura.	6
4.1.2.2. Estructura.	7
4.1.2.2.1. Las estructuras simples o no desarrolladas.	7
4.1.2.2.2. Estructuras compuestas.	8
4.1.2.3. Consistencia.	8
4.1.2.4. Densidad.	8
4.1.2.5. Aireación.	8
4.1.2.6. Temperatura.	9
4.1.2.7. Color.	9
4.1.3. El agua en el suelo	9
4.1.3.1. Constantes de humedad del suelo y tipos de agua en relación al tamaño de los poros.	10
4.1.3.2. Movimiento del agua en el suelo.	11
4.1.3.3. Movimiento del aire en el suelo.	12
4.1.4. Reacción química del suelo.	13
4.1.5. Fertilidad del suelo.	14
4.1.6. El suelo como un continuum dinámico en un ecosistema forestal.	16
4.2. Los sistemas agroforestales.	17
4.2.1. Definición.	17

4.2.2. Clasificación de los sistemas agroforestales.	18
4.2.2.1. Componentes de producción.	18
4.2.2.2. Arreglo en el Espacio.	19
4.2.2.3. Régimen de Manejo.	19
4.2.2.4. Función o papel.	19
4.2.3. Sistema agrisilvícola.	21
4.2.4. Características de <i>Leucaena leucocephala</i> y <i>Moringa oleífera</i> .	23
4.2.4.1. <i>Leucaena leucocephala</i> .	23
4.2.4.1.1. Fenología.	23
4.2.4.1.2. Propiedades fisiológicas.	23
4.2.4.1.3. Usos múltiples de la <i>Leucaena</i> .	24
4.2.4.2. <i>Moringa oleífera</i> .	25
4.2.4.2.1. Fenología.	25
4.2.4.2.2. Propiedades fisiológicas.	26
4.2.4.2.3. Usos múltiples de la <i>Moringa</i> .	26
4.3. La degradación del suelo, técnicas, obras de conservación y recuperación.	28
4.3.1. Prácticas vegetativas y mecánicas para el control de la erosión.	31
4.3.2. Terrazas individuales.	33
4.3.2.1. Objetivos de las terrazas.	33
4.3.2.2. Adaptabilidad de las terrazas.	33
4.3.2.3. Clasificación de las terrazas.	34
4.3.2.4. Criterios de diseños de terrazas.	35
5. MATERIALES Y MÉTODOS	38
5.1. Estudio diagnóstico del terreno.	38
5.1.1. Localización y características medioambientales del área de estudio.	38
5.1.1.1. Clima.	39
5.1.1.2. Vegetación.	39
5.1.1.3. Geología.	40
5.1.1.4. Hidrología.	40
5.1.1.5. Suelos.	40

5.1.1.6. Principales actividades productivas.	41
5.1.2. Selección del sitio.	41
5.1.2.1. Determinación de la pendiente.	42
5.1.2.2. Determinación de algunas propiedades físico-químicas del suelo.	42
5.1.2.3. Determinación de la capacidad de intercambio catiónico.	43
5.2. Establecimiento de la parcela experimental.	44
5.2.1. Levantamiento topográfico del terreno.	45
5.2.2. Cálculo de la erosión.	45
5.2.3. Cálculo del escurrimiento superficial.	49
5.3. Construcción de terrazas.	53
5.4. Metodología para establecer el sistema agroforestal y diseño experimental.	54
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	57
6.1. Características físico-químicas del suelo materia de estudio.	57
6.1.1. Textura.	58
6.1.2. Estructura.	58
6.1.3. Color del perfil del suelo.	58
6.1.4. Arcillas.	59
6.1.5. pH.	59
6.1.6. Conductividad eléctrica.	60
6.1.7. Contenido de materia orgánica.	60
6.1.8. Capacidad de intercambio catiónico.	61
6.1.9. Cationes y aniones solubles.	61
6.1.10. Vegetación que sostienen estos suelos.	64
6.1.11. Uso actual del suelo.	65
6.2. Determinación del escurrimiento superficial.	65
6.2.1. Determinación de la erosión hídrica.	70
6.2.2. De las terrazas.	72
6.3. Evaluación del diseño experimental.	78
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	84
7.1. Conclusiones.	84
7.2. Recomendaciones.	86
8. BIBLIOGRAFÍA	87

## INDICE DE TABLAS

	<b>Página</b>	
Tabla 1.	Clasificación de partículas minerales.	6
Tabla 2.	Tamaño de poro en el suelo.	10
Tabla 3.	Principales prácticas agroforestales y sus características.	20
Tabla 4.	Prácticas vegetativas y mecánicas más importantes para el control de la erosión.	32
Tabla 5.	Espaciamiento entre terrazas al considerar la pendiente (S) y la precipitación.	37
Tabla 6.	Clasificación de Suelos, según USDA.	46
Tabla 7.	Rango de valores para Erodabilidad del suelo (K).	47
Tabla 8.	Valores referenciales del índice de factor de uso y manejo del suelo C.	48
Tabla 9.	Índice de práctica conservacionista.	48
Tabla 10.	Grupos de suelos de acuerdo a sus características de escurrimiento.	50
Tabla 11.	Vegetación y Condición Hidrológica.	51
Tabla 12.	Curvas numéricas: uso, tratamiento y condición hidrológica del suelo.	52
Tabla 13.	Tratamientos en el sistema agroforestal.	55
Tabla 14.	Determinación textural de espesores del perfil de suelo materia de estudio.	58
Tabla 15a.	Determinación del color del perfil del suelo en seco materia de estudio.	59
Tabla 15b.	Determinación del color del perfil del suelo húmedo materia de estudio.	59
Tabla 16.	Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).	61
Tabla 17.	Concentración electrolítica y salinidad del suelo en el experimento.	63
Tabla 18.	Concentración electrolítica y salinidad del sedimento.	63
Tabla 19.	Cantidad de suelo removido por la lluvia en cada tratamiento.	74
Tabla 20.	Datos observados de cada variable para las plantas según su tratamiento.	83

## INDICE DE FIGURAS

	<b>Página</b>
Figura 1. Componentes del sistema suelo en sus tres fases.	4
Figura 2. Triangulo de textura del suelo.	6
Figura 3. Mediciones usadas en el espaciamiento entre terrazas.	36
Figura 4. Ubicación de la parcela experimental en San Pedro Mixtepec.	38
Figura 5. Trazo que indica la forma en que se determinó la pendiente del terreno.	42
Figura 6a. Determinación de la pendiente del terreno.	45
Figura 6b. Establecimiento del lote de escurrimiento.	45
Figura 7a. Trazo de curvas a nivel para la construcción de terrazas.	53
Figura 7b. Construcción de terrazas.	53
Figura 8a. Plantación de las especies leguminosas.	55
Figura 8b. El sistema agroforestal 48 días después de la plantación.	55
Figura 9. Análisis granulométrico por el método de Bouyoucos.	57
Figura 10. Determinación de la capacidad de intercambio catiónico.	
a) Después del centrifugado.	
b) Titulación con EDTA.	61
Figura 11. Determinación de Calcio y Magnesio por el método Colorimétrico.	
a) En el momento del vire.	
b) El cambio de color.	62
Figura 12. Erosión hídrica en los diferentes tratamientos.	75
Figura 13. Terrazas construidas a base de costales llenos de tierra y estacas.	76
Figura 14. Comportamiento de cada tratamiento con respecto a la variable altura.	78
Figura 15. Comportamiento de cada tratamiento con respecto a diámetro de copa.	80
Figura 16. Comportamiento de cada tratamiento con respecto a diámetro al cuello.	82

## RESUMEN

Para determinar el grado de recuperación de los suelos erosionados por deforestación en la microcuenca de San Pedro Mixtepec, Juquila, Oaxaca, se estableció un sistema agroforestal en terrazas individuales con dos especies de leguminosas: Resedá (*Moringa oleífera sp*) y guaje (*Leucaena leucocephala*); las cuales fueron evaluadas en base a su crecimiento durante seis meses para identificar cual de las dos especies o su plantación alterna proporciona un ambiente propicio para iniciar el proceso de recuperación. Aunado a esto, se realizó un análisis físico-químico del suelo en la parcela demostrativa, con la finalidad de conocer las características del mismo para el desarrollo de las plantas y cuantificar la migración iónica producida por el escurrimiento superficial mediante el establecimiento de un lote de escurrimiento.

Los resultados obtenidos en el experimento demuestran que el establecimiento de terrazas individuales en terrenos de ladera es de vital importancia para la recuperación del suelo ya que logran disminuir el arrastre de sedimentos ocasionados por la lluvia hasta en un 76 %. Con respecto al sistema agroforestal el análisis de varianza arrojó resultados a favor de *Moringa oleífera*, ya que durante el periodo que fueron evaluadas fue la que mayor crecimiento registró tanto en altura, diámetro de copa y diámetro al cuello de la raíz, con valores promedio de 1.40 m, 58.65 cm y 18.35 cm respectivamente; contra un 1.35 m, 54.87 cm y 11.23 cm para el caso de *Leucaena leucocephala*, y valores de 1.27 m en altura, 56.72 cm en diámetro de copa y 13.92 cm en diámetro al cuello para el caso de la plantación alterna con ambas especies.

Con respecto al análisis físico-químico del suelo, los resultados arrojados indican que la concentración electrolítica y la salinidad en la parcela demostrativa disminuye después de cada periodo de lluvias.

1. Palabras clave: Suelo, recuperación, sistema agroforestal, crecimiento, análisis físico-químico, erosión, terrazas, leguminosas.

## 1. INTRODUCCIÓN

De los factores que contribuyen a la degradación de suelos forestales, la erosión hídrica es sin duda la más importante, debido a que sus efectos son más evidentes en la formación de cárcavas lo que da como resultado zonas improductivas o de baja productividad para cualquier actividad económica. Se ha identificado que la causa principal de la degradación edáfica se debe a la deforestación inmoderada y a las actividades productivas antropogénicas en suelos cuya vocación es eminentemente forestal.

Una cuenca hidrográfica es una unidad ecológica en la que interaccionan los recursos agua-suelo-vegetación en un frágil equilibrio energético, el cual es fácilmente perturbado debido a las actividades agro productivas (Villanueva, 2002). En México se pierden anualmente un promedio de 365 millones de toneladas de suelo productivo, de los cuales 113 millones de toneladas, es decir, el 31% se quedan en los cuerpos de agua y el 69% restante descarga directamente al mar (Martínez y Rubio, 2001). Tal degradación conlleva esencialmente procesos de deforestación y colateralmente de erosión y denudación de suelos, lo que implica menores volúmenes de captación de aguas de lluvias y en consecuencia disminución de la producción de biomasa en los ecosistemas y agro-ecosistemas.

Este círculo vicioso es susceptible de modificarse en el tiempo (a escala humana), para lo cual es necesario valorar en su justa dimensión los recursos hídrico, edáfico y forestal. En efecto, se sabe que el agua es la sustancia fundamental para los procesos biológicos del planeta y que ninguna reacción orgánica puede llevarse a cabo sin ella.

Por su parte, el suelo es un *continuum* dinámico, trifásico y heterogéneo que permite el crecimiento y desarrollo de las plantas y de la mayoría de la macro y microfauna del planeta, así como de las más variadas actividades antrópicas (FitzPatrick, 1971).

En lo que respecta a la vegetación, ésta es fundamental, no sólo porque a través de su actividad fotosintética genera biomasa, sino también porque tiene la capacidad de captar agua de lluvia, de impedir la escorrentía superficial excesiva y de generar una infiltración

hídrica atenuada, todo ello genera microclimas que permiten el crecimiento de muchas especies vegetales, animales y de microorganismos, así como el abastecimiento continuo de agua a las reservas hídricas naturales como son los acuíferos. Adicionalmente, las raíces de las plantas cumplen la importante función de retener partículas de suelo impidiendo la erosión hídrica y eólica. En síntesis, el sistema suelo-planta desempeña un importante papel regulador en el ciclo del agua (Moment y Habermann, 1974).

La micro-cuenca de San Pedro Mixtepec se localiza al sur del Estado de Oaxaca entre las coordenadas 97°05' longitud oeste, 16°59' latitud norte, a una altura de 220 msnm, y con una superficie de 33,171 hectáreas, forma parte de la cuenca del Río Colotepec cuya superficie de 350 000 hectáreas no está exenta de procesos de deforestación, erosión y denudación de suelos que generan problemas de improductividad en los agro-ecosistemas practicados (INEGI, 2004).

Las comunidades rurales de la micro-cuenca se caracterizan porque en ellas se realizan actividades tales como la agricultura, la ganadería y la industria forestal, sin embargo, la microcuenca presenta una deforestación del orden del 30% aproximadamente, lo que conlleva la pérdida de suelo potencialmente productivo.

La degradación del suelo es un problema que implica la baja productividad o improductividad de los ecosistemas forestales impactando económica y ecológicamente a la sociedad. Por lo tanto, es de vital importancia desarrollar e implementar métodos y técnicas de recuperación de suelos con el fin de transmitirlos a los productores de la región de tal manera que el recurso permanezca en buenas condiciones.

El presente trabajo de investigación pretende evaluar la erosión hídrica laminar de un área específica de suelo forestal en la micro-cuenca de referencia, mediante el establecimiento de un lote de escurrimiento, cuyo resultado permita proponer alternativas técnicas de recuperación del mismo, tales como el establecimiento de terrazas (Bennett, 1974), y del establecimiento de un sistema agroforestal con especies leguminosas adaptadas a la selva baja caducifolia de la región costa, a saber: Resedá (*Moringa oleifera* Lam.) y guaje (*Leucaena leucocephala* L.

## II. OBJETIVOS

### 2.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar el grado de recuperación de los suelos erosionados por deforestación en un área experimental de la micro-cuenca de San Pedro Mixtepec, Juquila, Oaxaca, mediante el establecimiento de un sistema agroforestal en terrazas con dos especies de leguminosas: Resedá (*Moringa oleífera sp*) y guaje (*Leucaena leucocephala* ).

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Determinar el grado de erosión de los suelos deforestados en una parcela experimental dentro de la microcuenca mediante el establecimiento de un lote de escurrimiento.
- b) Evaluar las propiedades físico-químicas del suelo sujeto a procesos de erosión.
- c) Determinar cuál de las dos especies vegetales o su plantación alterna garantiza una mejor recuperación del sitio en función a su crecimiento.

## III. HIPÓTESIS

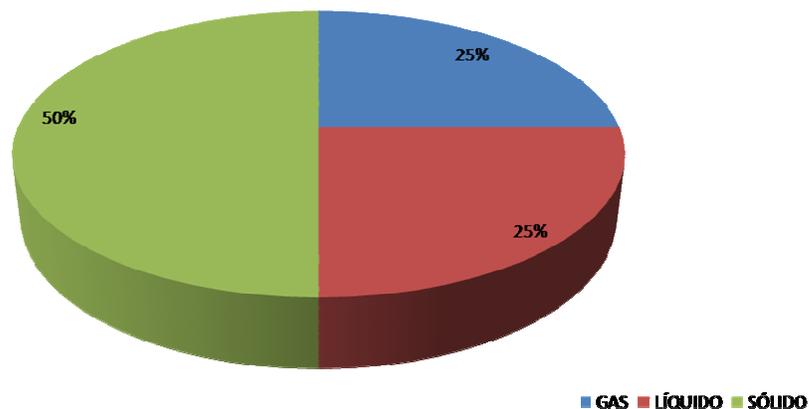
La degradación de los suelos forestales en la microcuenca de San Pedro Mixtepec, Oaxaca, se debe principalmente a la deforestación y falta de prácticas de manejo y conservación de éstos. El establecimiento de terrazas y la agroforestería con base en el cultivo de árboles de especies leguminosas, es una alternativa para su recuperación gradual en el mediano plazo.

## CAPÍTULO IV. REVISIÓN DE LITERATURA

### 4.1. CARACTERÍSTICAS PEDOGENÉTICAS Y FÍSICO-QUÍMICAS DEL SUELO

#### 4.1.1. Definición

El suelo puede definirse como un sistema de tres fases, formado por sólidos, líquidos y gases. En la mayor parte de los suelos la fase sólida se conforma por la fracción mineral que constituye su esqueleto estructural, y por la fracción orgánica representada por materiales vegetales y animales en distintos estados de descomposición (humus). La fase gaseosa la conforman distintas cantidades de oxígeno y bióxido de carbono, presentes en el sistema poroso del suelo; por su parte la fase líquida se constituye por el agua que ingresa al sistema a través de la precipitación pluvial y de la irrigación de campos cultivados, (FitzPatrick, 1984). En condiciones ideales, el 50% de los componentes deben corresponder a la fase sólida, del 15% al 35% a la fase líquida y del 15% al 35% a la gaseosa (Figura 1). Las variaciones en porcentaje de los dos últimos componentes se deben a la cantidad de agua presente.



**Figura 1:** Componentes del sistema suelo en sus tres fases.

En el sistema trifásico se generan procesos físico-químicos y biológicos, que dan origen a la masa no consolidada de la superficie de la corteza terrestre, a partir de la cual se desarrollan vegetales, animales y microorganismos. En dicho sustrato el hombre lleva a cabo la mayor parte de sus actividades productivas (Foth, 1990).

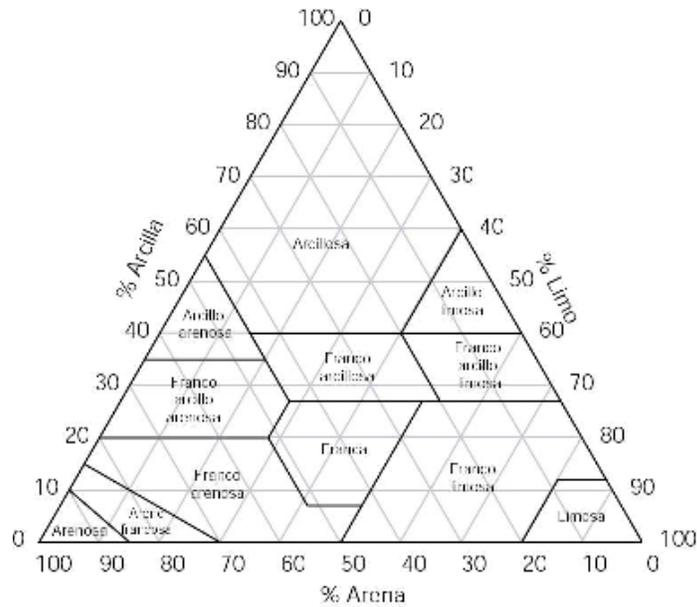
En síntesis, el suelo es un continuum dinámico natural, tridimensional, trifásico, localizado en la parte superior de la corteza terrestre, con características únicas, derivado de la transformación del material de origen o parental, que a través del intemperismo producido por los factores ambientales clima, vegetación, relieve, microorganismos y tiempo, inducen su formación transitoria, en una variedad de perfiles y horizontes (Sánchez *et al.* 2006).

En el caso particular de un suelo forestal, este se distingue de otros suelos por presentar propiedades y características asociadas al material parental, relieve, microclima, reciclaje de los elementos, tipo de población microbiana y a la formación de ácidos orgánicos provenientes de la descomposición de la tierra, todo lo cual incide en la migración de materiales minerales y orgánicos en el perfil del suelo y en conjunto determinan su integración al ecosistema forestal (Soto-Pinto, 1998).

#### **4.1.2. PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO**

El suelo es una mezcla de materiales sólidos, líquidos y gaseosos. La adecuada relación entre estos componentes determina la capacidad de crecimiento de las plantas y la disponibilidad de nutrientes suficientes para ellas. La proporción de los componentes determina una serie de propiedades que se conocen como propiedades físicas o mecánicas del suelo tales como textura, estructura, consistencia, densidad, aireación, temperatura y color.

**4.1.2.1. Textura:** La textura del suelo se define como la proporción relativa del tamaño de partículas de que se constituye (Figura 2), se trata entonces de la evaluación de la constitución granulométrica edáfica o porcentaje de arcillas, limos y arenas.



**Figura 2.** Triángulo de textura del suelo (USDA, 1990).

Las partículas minerales se clasifican como se indica en la tabla 1.

**Tabla 1.** Clasificación de partículas minerales (Boul, 1981).

Partículas minerales	Características
Fragmentos rocosos	Diámetro superior a 2 mm, y son piedras, grava y cascajo.
Arena	Diámetro entre 0.05 a 2 mm; puede ser gruesa, fina y muy fina. Los granos de arena son ásperos al tacto y no forman agregados estables, porque conservan su individualidad.
Limo	Diámetro entre 0.002 y 0.5 mm. Al tacto es como la harina o el talco, y tiene alta capacidad de retención de agua.
Arcilla	Diámetro inferior a 0.002 mm que al ser humedecida es plástica y pegajosa y cuando se seca forma terrones duros.

La proporción de estas partículas dan origen a cuatro tipos de suelos fundamentales por su textura: pedregosos (predominan los fragmentos rocosos), arenosos (predominan las arenas); limosos (predominan los limos), y arcillosos (predominan las arcillas). Entre estas cuatro categorías existe una infinidad de combinaciones (Gavande, 1979).

**4.1.2.2. Estructura:** es la forma en que las partículas del suelo se reúnen para formar agregados. De acuerdo a esta característica se distinguen suelos de estructura esferoidal (agregados redondeados), laminar (agregados en láminas), prismática (en forma de prisma), blocosa (en bloques), y granular (en granos). Define el estado de agregación de las partículas componentes minerales u orgánicas. Depende de la disposición de sus partículas y de la adhesión de las partículas menores para formar otras mayores o agregados. La permeabilidad del suelo al agua, aire y a la penetración de las raíces, depende en esencia de la estructura. A diferencia de la textura, la estructura puede ser modificada en forma transitoria por agentes físicos, químicos y biológicos (León, 2006).

Los tipos de estructura que actualmente se han determinado según Pinto (2000), son las siguientes: simples y compuestas.

#### **4.1.2.2.1. Las estructuras simples o no desarrolladas**

Las estructuras simples o no desarrolladas se clasifican de la siguiente manera:

- a) *Estructura particular:* Suelos compuestos por partículas individuales sin estructura y frecuentemente son suelos arenosos, fácilmente penetrables.
- b) *Estructura masiva:* Son aquellos con agregados consolidados en una masa uniforme, con cierto porcentaje de arcillas y materia orgánica, más difícil de penetrar en seco.
- c) *Estructura cementada:* Son aquellos en que los agregados han sido deformados, comprimidos o uniformados (pisoteo, laboreo, senderos).

#### 4.1.2.2. Estructuras compuestas

- a) *Estructura grumosa*: Suelos con agregados o grumos redondeados, migagozos o granulares, producto de la acción de las raíces y la descomposición de la materia orgánica fresca.
- b) *Estructura laminar*: Estructura con agregados en cuyas dimensiones predominan los ejes horizontales. Este tipo de estructura pone gran impedimento a la penetración de las raíces, al drenaje interno y a la germinación de las raíces.
- c) *Estructura en bloques*: Son equidimensionales, es frecuente en los horizontes inferiores (B y C), en suelos pesados de textura fija (arcillas)
- d) *Prismática o columnar*: Con bordes más o menos aristados, son de una buena productividad cuando son pequeños los prismas. Cuando pierden esta característica es sinónimo de degradación.

**4.1.2.3. Consistencia:** Es la resistencia para la deformación o ruptura de las partículas de suelo. Según la resistencia, el suelo puede ser suelto, suave, duro y muy duro. Esta característica tiene relación con la labranza del suelo y los instrumentos a usarse. A mayor dureza será mayor la energía (animal, humana o de maquinaria) a usarse para la labranza (Porta, *et al* 2003).

**4.1.2.4. Densidad:** Se refiere al peso por volumen del suelo, y está en relación a la porosidad. Un suelo muy poroso será menos denso; un suelo poco poroso será más denso. A mayor contenido de materia orgánica, más poroso y menos denso será el suelo (Pinto, 2000).

**4.1.2.5. Aireación:** Es el contenido de aire del suelo y es importante para el abastecimiento de oxígeno, nitrógeno y dióxido de carbono en el suelo. La aireación es crítica en los suelos anegados, se mejora con la labranza, la rotación de cultivos, el drenaje, y la incorporación de materia orgánica. Además, está relacionada con la granulometría, la porosidad (ver tabla 2) y el contenido de agua (Pinto, 2000).

**4.1.2.6. Temperatura:** Es importante porque determina la distribución de las plantas e influye en los procesos bióticos y químicos. Cada planta tiene sus requerimientos especiales; generalmente, a temperaturas superiores a 5° C es posible la germinación (Pinto, 2000).

**4.1.2.7. Color:** Depende de sus componentes y puede usarse como una medida indirecta de ciertas propiedades. El color varía con el contenido de humedad. El color rojo indica contenido de óxidos de Hierro y manganeso; el amarillo indica óxidos de Hierro hidratado; el blanco y el gris indican presencia de cuarzo, yeso-caolín y/o fierro reducido; y el negro y marrón indican materia orgánica. Cuanto más negro es un suelo, más productivo será, por los beneficios de la materia orgánica (Porta *et al*, 2003).

#### **4.1.3. EL AGUA EN EL SUELO**

El agua es uno de los constituyentes mas variables del suelo. Diferentes suelos tienen distintas capacidades de retención de agua. Además, un determinado suelo puede contener muy diversas cantidades de agua según sea el caso. Si hay demasiada agua en el suelo y no se drena, las raíces de las plantas pueden morir por falta de oxígeno. Por el contrario, si hay muy poca agua, el crecimiento de las plantas se retarda hasta detenerse, apareciendo el marchitamiento y finalmente la muerte de la planta (Gavande, 1979).

El contenido de humedad en el suelo, se expresa como porcentaje del peso del suelo seco a la estufa. Este porcentaje se determina por lo general para la capacidad de campo del suelo y para el suelo seco al aire. Lo anterior permite clasificar el agua que ingresa al suelo en forma de lluvia, granizo o nieve como de gravedad, capilar e higroscópica. Algunas veces el porcentaje de agua se determina en relación a otros puntos, tales como el porcentaje de saturación o el punto de marchitez permanente, este último tiene lugar cuando el suelo presenta un contenido mas alto de humedad que el del suelo seco al aire, y es el límite entre el agua aprovechable y la no aprovechable (Porta *et al*, 2003). Se reconocen los siguientes tipos de agua en el suelo (Gavande, 1979).

- *Agua estructural*: Esta contenida en los minerales del suelo (hidrómica, óxidos hidratados, etc.) solamente son liberados en procesos edáficos.
- *Agua higroscópica*: Es agua inmóvil, removida solamente por calentamiento o sequía prolongada.
- *Agua capilar*: Es agua retenida en los micro-poros por fuerza de capilaridad, el agua de los capilares mayores puede percolar pero no puede drenar fuera del perfil.
- *Agua gravitacional*: Es agua retenida en los macro poros y puede drenar fuera del perfil.

#### **4.1.3.1. Constantes de humedad del suelo y tipos de agua en relación al tamaño de los poros**

La capacidad de campo es el porcentaje de agua que un suelo retiene mediante tensión superficial, después de ser saturado con agua y drenado por acción de la gravedad. El suelo mantiene esta condición durante los 2 o 3 días siguientes a la lluvia. Por consiguiente, el suelo permanecería más o menos con este mismo contenido de agua indefinidamente si no fuera ésta absorbida por la planta o se evaporara. El agua que rebasa tal cantidad se conoce como de gravedad. La capacidad de campo marca el límite entre el agua capilar y gravitacional, indica la máxima cantidad de agua que puede retener el suelo después de tres días de aporte de agua. En la capacidad de campo de un suelo franco o arcilloso, este retiene agua a una presión de 0.3 atmósferas. Mientras que los suelos arenosos lo hacen a 0.1 atmósferas (Foth, 1985).

**Tabla 2.** Tamaño de poro en el suelo (Pinto, 2000).

TIPO DE AGUA	DIÁMETRO ( D ) DEL PORO (mm)	DIÁMETRO ( D ) DE PARTÍCULAS QUE CONFORMAN LOS POROS (mm)
Agua higroscópica	No rellena poros	-----
Agua capilar	$D < 0.008$	$D < 0.05$ (limo y arcillas)
Agua gravitacional de evacuación lenta	$0.008 < D < 0.05$	$0.05 < D < 0.02$ (arena fina)
Agua gravitacional de evacuación rápida	$D > 0.05$	$D > 0.02$ (arena media)

El agua capilar se halla en el suelo a capacidad de campo, pero puede perderse por evaporación; se presenta en películas de agua alrededor de las partículas del suelo y llena los poros más pequeños. Comprende aquella agua aprovechable para el crecimiento de las plantas y cierta cantidad de la no aprovechable. La solución del suelo la constituye en su mayor parte el agua capilar más los materiales disueltos en ella (Gavande, 1979).

El agua higroscópica puede moverse del suelo seco al aire por medio de secado a la estufa en un intervalo de 105 - 110 °C durante 24 horas o más. Se presenta como una fina película alrededor de las partículas del suelo, probablemente de espesor de dos o tres capas de moléculas de agua. Las grandes áreas de las superficies exteriores de arcilla y materiales orgánicos retienen más agua higroscópica que otros suelos (Foth, 1985).

#### 4.1.3.2. Movimiento del agua en el suelo

El movimiento del agua en el suelo se debe a la influencia de la gravedad, la acción capilar y los gradientes de temperatura. La influencia de la gravedad es efectiva cuando existe agua en demasía, al extremo de casi llenar los poros del suelo. Este fenómeno es

importante para la remoción del exceso de agua del suelo después de la lluvia. Se dice que el suelo está saturado, y el movimiento del agua se llama flujo saturado, aún cuando todavía existan bolsas de aire aisladas en el suelo (Foth, 1985).

El movimiento capilar del agua se presenta como respuesta a un gradiente de tensión. La tensión es producto de la atracción que experimentan las moléculas de agua hacia la superficie de las partículas del suelo (adhesión) y hacia sí mismas (cohesión). La fuerza involucrada se conoce como tensión de la humedad del suelo (Gavande, 1979).

Cuanto más delgada sea la capa de agua alrededor de las partículas del suelo y más pequeños los poros llenos de agua, más elevada será la tensión de la humedad del suelo. Si existe diferencia en la tensión de la humedad del suelo entre dos lugares próximos, el agua tenderá a moverse lentamente del lugar de menor tensión al de mayor. Tal movimiento se conoce como movimiento capilar o flujo no saturado, y ayuda a las plantas a obtener humedad del suelo, pero por lo general es demasiado lento para satisfacer sus necesidades. La extensión de la raíz hacia nuevas partes del suelo es por consiguiente necesaria para satisfacer los requerimientos del agua de la planta. El movimiento capilar es lento en aquellos suelos donde los poros son pequeños, y prácticamente nulo en suelos casi secos (León, 2006).

El agua puede moverse también en forma de vapor, como respuesta a un gradiente de temperatura si el suelo presenta corredores continuos llenos de aire. El agua se evapora en la región más caliente, pasa a través de los poros y se condensa en la región mas fría. Este proceso se conoce como transporte de vapor. Es un medio lento del movimiento del agua; pero puede ocurrir en suelos demasiado secos, en los que no tiene lugar el movimiento capilar (Foth, 1985).

#### **4.1.3.3. Movimiento del aire en el suelo**

La estructura del suelo afecta el crecimiento de las plantas, debido a su influencia en el aire y agua del suelo; así mismo, perturba el movimiento mecánico de raíces y brotes, y las relaciones de temperatura en el suelo (Pinto, 2000).

Cuando la concentración de bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) se torna muy alta y la de oxígeno muy baja, el crecimiento de las plantas se retarda. La velocidad de difusión de los gases en el suelo está en relación directa con la porosidad llena de aire. La difusión de gases a través del suelo y el cambio con la atmósfera son muy pequeños cuando la porosidad llena de aire es menor del 10 %; presumiblemente porque los poros no son continuos. En tales condiciones, aun las plantas más tolerantes de las tierras altas siempre sufren por la aeración restringida del suelo. (Gavande, 1979).

El tamaño de los poros y las condiciones de drenaje determinan la porosidad llena de aire, lo mismo que el encogimiento y el hinchamiento. Si el suelo contiene una cantidad apreciable de agregados, relativamente estables, de tamaño moderado, 1 a 5 mm de diámetro, por lo general tendrá suficientes poros grades para una aeración adecuada, cuando las condiciones de drenaje son buenas. En suelos con mal drenaje, aun los poros más grandes estarán llenos de agua y el suelo tendrá aeración inadecuada (Gavande, 1979).

#### **4.1.4. REACCIÓN QUÍMICA DEL SUELO**

La reacción química del suelo o el pH es la expresión del contenido de iones de hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) e hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ) en el suelo, como consecuencia de las diversas reacciones químicas. El pH se mide con potenciómetros de diversos tipos y sobre una escala de 1 a 14. Un valor menor a 6.5 indica suelos ácidos; entre 6.5 y 7.0 indica suelos neutros; mientras que un valor superior a 7.0 indica suelos con tendencia alcalina. Los mejores suelos son aquellos con valores cercanos a pH neutro. Los suelos demasiado ácidos o alcalinos no son buenos para la agricultura. Esta condición puede ser corregida mediante técnicas de preparación, siempre que sea posible y rentable. Cuando es muy caro para las actividades agrícolas se podrán plantar bosques con especies adecuadas a esas condiciones (León, 2006).

Se entiende por pH la actividad del ión hidrógeno de soluciones ácidas muy diluidas y se define como el logaritmo inverso de la actividad del ión  $\text{H}^+$  es decir:

$$\text{pH} = \log_{10} 1 (\text{H}^+)^{-1}$$

Donde:  $\text{H}^+$  = actividad del ión hidrógeno ( $\text{mol L}^{-1}$ ).

Para León (2006) la acidez del suelo proviene de distintas fuentes; tales como:

- 1) Humus o materia orgánica. Contiene grupos carboxilos, fenólicos y aminos que ligan con  $\text{H}^+$ , estos grupos saturados con  $\text{H}^+$  se comportan como ácidos diluidos; el  $\text{H}^+$  ligado covalentemente, se disocia dependiendo de la constante de disociación del ácido formado. El grado de disociación depende de la heterogeneidad de la materia orgánica.
- 2) Barros minerales. Su carga se origina por sustitución isomórfica (carga permanente) y por disociación de iones hidrógenos de grupos hidroxilos o del agua de constitución, ambos componentes del retículo cristalino de las arcillas, esta carga depende del pH. Hoy día se sabe que tanto el ion  $\text{Al}^{+3}$  como el  $\text{H}^+$  y la pérdida de cationes básicos ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) están implicados en el desarrollo de suelos ácidos.
- 3) Hidróxidos. Los hidróxidos de fierro y aluminio liberan iones  $\text{H}^+$  cuando el pH disminuye.
- 4) Sales solubles. Las sales ácidas, neutras y básicas en la solución del suelo provienen del intemperismo natural, de la descomposición de la materia orgánica o por adición de fertilizantes; los cationes de estas sales pueden intercambiar con  $\text{Al}^{+3}$  adsorbido y causan un aumento en la acidez de la solución del suelo.

La reacción del suelo normalmente oscila entre pH de 3 a 9, pero puede registrar valores fuera de estos límites. Valores bajos se presentan en suelos pantanosos y ciénagas que contienen pirita o azufre elemental; en contraste altos valores de pH se presentan en suelos con alto contenido de carbonatos de sodio (León, 2006).

Dos factores controlan el pH del suelo. 1) La materia orgánica y el tipo de materiales orgánicos y 2) la cantidad de cationes adsorbidos y en solución. La reacción del suelo afecta el crecimiento de las plantas por su influencia en la disponibilidad de ciertos elementos nutrimentales necesarios para su desarrollo, así por ejemplo: los fosfatos reducen su actividad en suelos ácidos, el magnesio reduce su actividad en suelos con gran contenido de materia orgánica; el molibdeno es indispensable para las plantas en suelos ácidos. En contraste el nitrógeno aplicado en forma amoniacal en suelos alcalinos se volatiliza (León, 2006).

Muchos microorganismos se desarrollan en el suelo en función del pH, así por ejemplo: las bacterias se desarrollan en pH ácido, por su parte los actinomicetos se desarrollan en suelos alcalinos; muchos de estos organismos producen enfermedades en las plantas cultivadas. En síntesis la determinación del pH de un suelo es esencial para corregir problemas de acidez o alcalinidad del mismo (Sánchez *et al*, 2006).

#### 4.1.5. FERTILIDAD DEL SUELO

El suelo es la base para el crecimiento de los organismos vegetales, que producen materia orgánica por el proceso de la fotosíntesis. La materia orgánica producida sirve de alimento a las mismas plantas, a los animales y al hombre. Para que el suelo sostenga plantas debe tener ciertas condiciones, que se conocen como fertilidad, que depende de varios factores como los que se describen a continuación (León, 2006).

- a) **El espesor del suelo útil:** Es la capa de materiales sueltos, o sea los horizontes O, A y B. La falta de los horizontes O o A significa que los suelos son pobres en materia orgánica y, en consecuencia, de poca fertilidad.
  
- a) **La cantidad de materia orgánica presente:** La materia orgánica o humus es esencial para la fertilidad de los suelos.

- b) **Los organismos vivos del suelo:** Los organismos vivos del suelo juegan un rol muy importante en la transformación de la materia orgánica. Su presencia es indispensable para la fertilidad de los suelos. Cuando el suelo se contamina, por exceso de pesticidas y fertilizantes químicos, los organismos vivos se reducen o mueren, lo que afecta la fertilidad.
- c) **La capacidad de almacenar las sustancias nutritivas contenidas en la solución del suelo:** Esta capacidad se conoce como fuerza de adsorción. La mayor capacidad la tienen los coloides del suelo, a los que pertenecen en primer lugar las arcillas y el humus. Gracias a su carga eléctrica estos coloides pueden almacenar compuestos minerales esenciales para las plantas.

Los elementos minerales esenciales son los siguientes:

• *Macro-nutrientes:* son aquellos que las plantas requieren en mayores proporciones para su crecimiento y desarrollo tales como: (carbono - C, hidrógeno - H, y oxígeno - O); derivados de minerales (calcio - Ca, magnesio - Mg, y potasio - K); derivados de materia orgánica (nitrógeno - N); y derivados de minerales y materia orgánica (fósforo-P, y azufre- S) (León, 2006).

• *Micro-nutrientes:* son aquellos requeridos por los organismos vegetales en proporciones muy pequeñas. Por ejemplo: el boro (B), el cloro (Cl), el cobre (Cu), el Hierro (Fe), el manganeso (Mn), el molibdeno (Mo) y el zinc (Zn) (León, 2006).

#### **4.1.6. EL SUELO COMO UN CONTINUUM DINÁMICO EN UN ECOSISTEMA FORESTAL**

El suelo está constituido por material orgánico y mineral, corresponde a un componente ambiental vital para el ecosistema, ya que sirve de soporte y controla la disponibilidad del agua y los nutrientes requeridos para el desarrollo de las plantas. El suelo es uno de los factores que determina la calidad de un sitio, siendo un importante

componente del ecosistema forestal que influye considerablemente en la tasa de crecimiento de las plantas y en la resistencia de especies a enfermedades (Buol *et al*, 1981).

El suelo constituye un recurso fundamental para las actividades humanas, y es un sistema integrado que incluye especies vegetales, animales y microorganismos diversos, que interactúan mediante procesos físicos y biológicos que ayudan a mantener los ciclos del agua, energía y nutrientes que son el pilar del ecosistema forestal en su conjunto. El suelo sirve también de un verdadero filtro para proteger y amortiguar los otros componentes del ecosistema forestal de diversos procesos de daño o contaminación. Las características del suelo influyen en gran medida en el tipo de vegetación y en la microfauna que a su vez contribuyen al mantenimiento de la biodiversidad del ecosistema forestal. Por otra parte, el suelo, como componente básico del ecosistema forestal constituye el principal insumo de la producción en un determinado sitio (Buol *et al*, 1981).

## **4.2. LOS SISTEMAS AGROFORESTALES**

La creciente presión antrópica sobre el suelo debida al aumento de la densidad de población registrada en las zonas tropicales y subtropicales del planeta, ha conducido a la degradación de los mismos, disminuyendo el rendimiento de los cultivos y favoreciendo a la invasión de especies vegetales indeseables en un ecosistema. Una de las alternativas para frenar este proceso y hacer un uso óptimo del recurso es a través del manejo de sistemas agroforestales.

Los sistemas agroforestales de acuerdo con Young (1997), son una forma de uso de la tierra en donde plantas leñosas perennes interactúan biológicamente en un área con cultivos y/o animales; el propósito fundamental es diversificar y optimizar la producción para un manejo sostenido.

### **4.2.1. DEFINICIÓN**

Los sistemas agroforestales, son formas de uso y manejo de los recursos naturales en los cuales especies leñosas (árboles y arbustos), son utilizados en asociación deliberada con cultivos agrícolas y con animales, en un arreglo espacial (topológico) o cronológico (en el tiempo) en rotación con ambos. Existen interacciones ecológicas y económicas entre los

árboles y los otros componentes de manera simultánea o temporal y secuencial, que son compatibles con las condiciones socioculturales para mejorar las condiciones de vida de la región (Nair, 1997).

Por su parte Krishnamurthy (1999) define a la agroforestería como el arte y la ciencia del cultivo de árboles en combinación interactiva con cultivos anuales y/o animales en la misma unidad de tierra para múltiples propósitos y se considera como una opción viable para el uso sostenible de la tierra. La agroforestería como ciencia se basa en la silvicultura, la agricultura, la ganadería, la acuicultura y la piscicultura, el manejo de recurso tierra y otras disciplinas que en conjunto constituyen el enfoque sistemático e interdisciplinario del uso de la tierra.

Un sistema agroforestal se aplica tanto en ecosistemas frágiles como estables, con diversas agrimensuras (grandes superficies de cultivo, fincas, parcelas para autoconsumo, etc.), consideran el aspecto comercial o en su caso de subsistencia. El objetivo es diversificar la producción, controlar la agricultura migratoria, aumentar el nivel de materia orgánica en el suelo, fijar el nitrógeno atmosférico, reciclar nutrientes, modificar el microclima y optimizar la producción del sistema, respetando el principio de sistema sostenido (Nair, 1997).

#### **4.2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS AGROFORESTALES**

En base a Krishnamurthy (1999), Nair (1997) y Younk (1997) existen clasificaciones que van de acuerdo a los componentes que conforman un agro-ecosistema determinado y la distribución que tienen estos en el tiempo y el espacio. Los factores importantes incluidos en la distinción de los sistemas agroforestales son:

- Componentes de producción
- Arreglos en el espacio (horizontal y vertical)
- Arreglos en el tiempo (simultáneos y secuenciales)
- Régimen de manejo
- Función o papel

#### 4.2.2.1. Componentes de producción

Los tres componentes principales en la agroforestería son árboles, cultivos y animales/pastura. La relativa predominancia de estos componentes define las siguientes categorías estructurales (Krishnamurthy, 1999).

1. Sistemas agrisilvícolas (árboles y cultivos estacionales)
2. Sistemas silvopastoriles (árboles y animales/pasturas)
3. Agrosilvopastoriles (árboles, cultivos estacionales y animales/pasturas)
4. Árboles predominantes: silvicultura con otros componentes subordinados
5. Componentes especiales presentes: árboles con insectos o peces.

#### 4.2.2.2. Arreglo en el espacio

La ordenación o arreglo en el espacio de acuerdo con Krishnamurthy (1999) puede ser vertical u horizontal y se describe principalmente con base en el componente árbol.

a) Arreglo espacial vertical:

- *Monoestrato* con solo un estrato de árboles como el cultivo en callejón y setos vivos.
- *Multiestratos* con dos o más estratos de árboles como en los huertos familiares, o los rompevientos con varias especies de árboles.

b) Arreglo espacial horizontal:

- *Zonal* en la cual las diferentes especies permanecen cada una contigua hasta cierta extensión como las franjas, parcelas o surcos alternos como en el cultivo en callejones; ó
- *Mixta* donde los diferentes componentes son ordenados de una manera irregular, como en los huertos caseros y árboles dispersos en tierras de cultivo.

#### 4.2.2.3. Régimen de manejo

El manejo de los sistemas agroforestales se refiere a las técnicas usadas por los agricultores para asegurar que el sistema provea los productos o funciones de servicio esperadas. El nivel de insumo de manejo puede ser grande o pequeña, la meta comercial puede ser de subsistencia, intermedia o comercial. (Krishnamurthy, 1999 y Nair, 1997).

#### 4.2.2.4. Función o papel

La función o el papel del sistema agroforestal significa lo que se intenta proveer o hacer, principalmente proporcionado por los componentes leñosos. Puede ser el mejoramiento de la fertilidad del suelo, el control de la erosión del suelo, la producción de forraje o la diversificación de productos (Krishnamurthy, 1999).

A continuación se describen brevemente las prácticas agroforestales más utilizadas y sus principales características, según Nair (1997).

**Tabla 3.** Principales prácticas agroforestales y sus características (Nair, 1997).

<b>Práctica agroforestal</b>	<b>Breve descripción (del arreglo de sus componentes)</b>
<b>Sistemas agrisilvícolas</b> (cultivos + incluyendo arbustos/enredaderas/cultivos de árboles)	
(1) Barbecho mejorado	Especies leñosas plantadas para que crezcan durante la fase de barbecho.
(2) Taungya	Conjunto combinado de especies leñosas y agrícolas durante las primeras etapas del establecimiento de las plantaciones.
(3) Cultivo en callejón	Especies leñosas en setos, especies agrícolas en callejones, entre los setos, arreglo microzonal o de franjas.

(4) Jardines multiestratos	Multiespecies, asociaciones densas de plantas en multiestratos con ningún arreglo organizado de plantación.
(5) Árboles de usos múltiples en tierras de cultivo	Árboles dispersos al azar o de acuerdo con modelos algo sistemáticos sobre bancos o diques, terrazas o límites de parcelas/campo.
(6) Combinaciones de cultivos y plantaciones	1. Mezcla (mixta, densa) integrada de multiestratos de cultivos de plantación. 2. Mezclas de cultivos de plantación en arreglos alternos u otros regulares. 3. Árboles de sombra para cultivo de plantación; árboles de sombra dispersos. 4. Intercalado con cultivos agrícolas.
(7) Huertos caseros	Combinaciones, de árboles multiestratos y cultivos alrededor de las viviendas.
(8) Árboles para la conservación y recuperación de suelos	Árboles en bancos, diques, terrazas, levantamientos, etc. con o sin franjas de pastos; árboles para la recuperación de suelos.
(9) Cinturones de protección y rompevientos, setos vivos	Árboles alrededor de tierras agrícolas/parcelas.
(10) Producción de leña	Especies para leña alrededor de tierras agrícolas o en ellas.

---

**Sistemas silvopastoriles** (árboles + pasturas y/o animales)

---

(11) Árboles en pastizales	Árboles dispersos irregularmente o dispersos de acuerdo a algún modelo sistemático.
(12) Bancos de proteína	Producción de forraje de árbol rico en proteína en fincas/llanuras en producción de forraje de corte y carga.
(13) Cultivo de plantaciones con pasturas y animales	Ejemplo: ganado bajo palmeras de coco en el sudeste de Asia y el sub pacífico.

---

### Sistemas agrosilvopastoriles (árboles + cultivos + pastura/animales)

---

- |                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| (14) Huertos caseros con animales    | Combinaciones cerradas de multiestratos de varios árboles y cultivos y animales, alrededor de los hogares. |
| (15) Setos leñosos de usos múltiples | Setos leñosos para el ramoneo, acolchados, abono verde, conservación de suelos, etc.                       |
| (16) Apicultura con árboles          | Árboles para producción de miel.   |
| (17) Acuaforestería                  | Árboles alrededor de estanques, las hojas usadas como "forraje" para peces.                                |
| (18) Bosquetes de usos múltiples     | Para varios propósitos (madera, forraje, protección del suelo, recuperación de suelo, etc.).               |

#### 4.2.3. SISTEMA AGRISILVÍCOLA

Sin embargo, Krishnamurthy (1999) afirma que el sistema agrisilvícola es un amplio rango de técnicas agroforestales donde se combinan cultivos con arbustos y/o árboles de usos múltiples dentro de un arreglo mixto-espacial y zonal. Dentro del sistema agrisilvícola mixto espacial se encuentran las siguientes prácticas agroforestales:

- Huertos caseros: Son un sistema de producción a pequeña escala que provee consumo vegetal, animal o algún otro producto utilitario; se localizan cerca de las habitaciones por seguridad, conveniencia y cuidado especial de las familias.
- Combinaciones plantación cultivo: Producción de dos o más cultivos de árboles de uso múltiples en combinación con herbáceas y animales.

Dentro del sistema agrisilvícola zonal se encuentran las siguientes practicas agroforestales (Krishnamurthy, 1999).

- Cultivo en callejones: Es un sistema de producción en el cual los arbustos y árboles de usos múltiples (preferentemente especies leguminosas de rápido crecimiento) son establecidas en setos vivos sobre tierras arables de cultivo, con cultivos de alimentos cultivados en los callejones entre los setos vivos.
- Cercos vivos: Son árboles o arbustos plantados que separan un pedazo de tierra de otra y generalmente se mantienen con podas periódicas que al mismo tiempo sirve de alimento para el ganado.
- Barreras rompevientos y cinturones de protección: La barrera rompevientos denota a un grupo de árboles o arbustos de usos múltiples en cualquier ordenamiento que proporciona protección de los fuertes vientos a los cultivos, animales o ambos. El cinturón de protección es un amplio rompevientos con árboles y arbustos vivos establecido y mantenido para la protección de tierras agrícolas sobre un área más grande que una sola finca.

De acuerdo con Nair (1997) el sistema agrisilvícola ubica dos importantes prácticas agroforestales de gran utilidad para la conservación y recuperación de suelos:

- a) Árboles para la conservación y recuperación de suelos: esta práctica involucra a árboles plantados en bancos, diques, terrazas, levantamientos etc. con o sin franjas de pastos con el objetivo de recuperar el suelo.
- b) Árboles de usos múltiples en tierras agropecuarias: son árboles dispersos al azar o de acuerdo con modelos algo sistemáticos sobre bancos o diques, terrazas o límites de parcelas.

Para el presente trabajo se tomó la clasificación de Nair (1997) de acuerdo a la actividad de conservación y recuperación de suelo por medio de prácticas agroforestales, por lo cual se optó por utilizar las dos prácticas arriba mencionadas en un esquema combinado (árboles de usos múltiples plantados sobre terrazas individuales) con la

finalidad de aumentar los beneficios para una acelerada recuperación del recurso suelo. Así, una vez hecho el sistema de terrazas individuales en curvas de nivel a través de la pendiente, se plantaron los árboles de uso múltiples sobre las terrazas y de esta manera controlar la pérdida de suelo por erosión hídrica y al mismo tiempo acelerar la recuperación físico-química del suelo por medio del establecimiento de especies vegetales. Las especies de árboles de uso múltiples utilizadas para este experimento son: Guaje (*Leucaena leucocephala*) y Resedá (*Moringa oleífera*) cuyas características se describen en párrafos subsecuentes.

Cabe mencionar que este sistema agrisilvícola en un futuro podrá ser evaluado como un sistema silvopastoril ya que por las condiciones del terreno que es netamente pecuario y por la característica forrajera que poseen las especies utilizadas existe la posibilidad de integrar un elemento más al sistema para determinar, entre otras cosas, la viabilidad del forraje para alimentar el ganado.

En contexto de la agroforestería, los árboles de usos múltiples (AUMs) se ven como aquellos árboles y arbustos que son deliberadamente mantenidos y manejados para más de un uso, producto, y/o servicio preferido; la retención o cultivo de estos árboles es motivada, en forma general, por razones económicas y ecológicas, en un sistema de uso de la tierra de inversiones múltiples. Entonces, el término “usos múltiples” como se aplica a los árboles para la agroforestería se refiere a su uso para obtener más de un servicio o función productiva en un sistema agroforestal. Se puede decir que el árbol de uso múltiple es el componente más distintivo de la agroforestería y que el buen resultado de la misma como una opción viable de uso de la tierra, depende de explotar el potencial de éstos AUMs, muchos de los cuales son relativamente poco conocidos fuera de su hábitat (Nair, 1997).

#### **4.2.4. Características de *Leucaena leucocephala* y *Moringa oleífera***

##### **4.2.4.1. *Leucaena leucocephala* (Lam.) Zárate R. (1987).**

**Nombre común:** guaje casero

**Forma.** Árbol o arbusto caducifolio o perennifolio, de 3 a 6 m (hasta 12 m) de altura con un diámetro a la altura del pecho de hasta 25 cm.

#### 4.2.4.1.1. Fenología

**Follaje.** Perennifolio / Caducifolio.

**Floración.** Florece a lo largo del año dependiendo de la precipitación o disponibilidad del agua.

**Fructificación.** Fructifica a lo largo del año. Los frutos maduran de marzo a abril.

**Polinización.** Entomófila (insectos).

#### 4.2.4.1.2. Propiedades fisiológicas

**Asociación con nódulos.** Tiene la capacidad de formar nódulos fijadores de nitrógeno en las raíces.

**Adaptación.** Especie de fácil adaptación.

**Competencia.** Buena capacidad competitiva.

**Crecimiento.** Especie de rápido crecimiento, longevidad de 50 años. Muestra un incremento medio anual de 2.8 m en altura y 2.4 cm en diámetro. El crecimiento es lento en las primeras etapas de desarrollo de la planta.

**Descomposición.** La hojarasca presenta una rápida descomposición.

**Establecimiento.** Es lenta para establecerse, pero una vez establecida, su productividad es alta aún bajo defoliación regular.

**Producción de hojas, flores, frutos, madera y/o semillas.** Buena productora de materia orgánica. Tiene capacidad para formar follaje fácilmente. Sus hojas tienen un alto contenido de nitrógeno (4.3 % peso seco) de acuerdo con Zárate (1987).

#### **4.2.4.1.3. Usos múltiples de la *Leucaena***

Se cultiva en la mayoría de los países tropicales siendo ampliamente investigada en plantaciones experimentales, con una amplia gama de condiciones de clima y suelo. En el aspecto de reforestación y restauración de suelos es una especie con potencial para reforestación productiva tanto en zonas degradadas de selva como en zonas secas y áridas. Se ha utilizado con éxito en programas de reforestación de zonas erosionadas y en plantación urbana. En Hawai se siembra desde el aire en suelos desnudos y erosionados; en Indonesia se ha plantado con el propósito de restaurar laderas volcánicas inestables (FAO, 1999).

En cuanto a sus características, en México se le ha considerado como un árbol de uso múltiple de gran interés agro-silvícola. (Zárate, 1987).

- Con frecuencia se le encuentra en huertos familiares de zonas tropicales sub-húmedas, intercalada con cultivos agrícolas.
- Se usa en plantaciones en linderos, como sombra para cultivos perennes comerciales (sombra en cafetales), cultivos en callejones, callejones forrajeros y barbechos mejorados.
- Efecto restaurador: 1. Acolchado / Cobertura de hojarasca, esta planta produce un excelente abono verde o mantillo. 2. Control de la erosión. 3. Estabilización de suelos. Cuando se planta en curvas de nivel, mejora la estructura del suelo y evita la erosión. 4. Drenaje de tierras inundables. Las raíces extendidas desintegran capas de subsuelo impermeables lo que mejora la penetración de agua y disminuye la lixiviación de la superficie. 5. Fijación de nitrógeno.

- Aromatizante: Aceites esenciales aromáticos.
- Artesanal: Las semillas se utilizan como piezas de joyería en la India.
- Colorantes: Suministro de colorantes textiles.
- Combustible: Leña y carbón de excelente calidad. Tiene un alto poder calorífico: 4200-4600 kcal/kg.
- Comestible: Los frutos son muy apreciados por su alto contenido en vitamina A y proteínas (46%). Las semillas maduras son empleadas como sustituto de café.
- Construcción: Construcción rural (ligera).
- Forrajero: hoja, vástago, semilla, fruto. Forraje para rumiantes. Las hojas constituyen un excelente forraje (4 a 23 % de materia fresca; 5 a 30 % de materia seca; 20 a 27 % de proteína, rico en calcio, potasio y vitaminas). Tienen un porcentaje de digestibilidad de 60 a 70 %.
- Industrializable: Pulpa para papel.
- Maderable: Aserrío, postes.
- Medicinal: Remedio contra parásito y la viruela.
- Melífera: Apicultura.
- Tutor: Los fustes delgados de 5 a 7 cm son comercializados como tutores para el cultivo de tomate y chile dulce. Su duración se limita a un año.

#### **4.2.5. *Moringa oleífera***

**Nombre común:** Resedá, árbol de bequeta, ángela, árbol de los espárragos, árbol de las perlas, árbol “ben” entre otros.

**Forma:** Árbol siempre verde de tamaño pequeño y crecimiento acelerado que usualmente alcanza de 10 a 12 m de alto.

##### **4.2.5.1. Fenología**

**Follaje:** Perennifolio/caducifolio

**Floración:** Existen grandes variaciones en la fenología del florecimiento de acuerdo al sitio donde crece. Normalmente florece entre los meses de abril y junio, dependiendo de las condiciones climáticas del lugar y de la disponibilidad del agua.

**Fructificación:** Las frutas son unas cápsulas de color pardo, de tres lados, lineares y pendientes, con surcos longitudinales, usualmente de 20 a 45 cm de largo, aunque a veces hasta de 120 cm de largo, y de 2 a 2.5 cm de ancho. Las frutas alcanzan la madurez aproximadamente 3 meses después del florecimiento.

#### **4.2.5.2. Propiedades fisiológicas**

**Adaptación.** Especie de fácil adaptación a climas tropicales.

**Competencia.** Las plántulas son susceptibles a la sequía y a la competencia con gramíneas. Una vez establecidos, los árboles jóvenes y en etapa de poste son muy resistentes y capaces de sobrevivir tanto las sequías como la competencia radical.

**Crecimiento.** El resedá crece con rapidez en lugares favorables, incrementando de 1 a 2 m por año en altura durante los primeros 3 a 4 años. Mientras que los árboles rara vez alcanzan de 10 a 12 m, en ocasiones alcanzan de 15 a 16 m de alto con diámetros normales de hasta 75 cm.

**Descomposición.** Presenta una rápida descomposición en la hojarasca.

**Establecimiento.** No presenta problemas de adaptación ya que crece en casi todos los tipos de suelos aún con escasos requerimientos de nutrientes.

#### **4.2.5.3. Usos múltiples de la *Moringa*.**

La *Moringa oleífera* tiene un futuro prometedor en la industria alimenticia y como alimento proteico para deportistas especialmente atendiendo a su carácter de alimento natural. Esta planta se está revelando como un recurso de primer orden y bajo coste de producción para prevenir la desnutrición y múltiples patologías, como la ceguera infantil, asociadas a carencias de vitaminas y elementos esenciales en la dieta. Tales características

han llevado a investigadores y empresas internacionales a empezar a invertir en experimentos con esta planta y cada día se descubren más características que la hacen viable productiva y comercialmente (Folk-ard y Sutherland, 1994). A continuación se enlistan algunas de ellas.

- Comestibilidad: Todas las partes de la planta son comestibles. El contenido de proteínas, vitaminas y minerales es sobresaliente. El sabor es agradable y las diversas partes se pueden consumir crudas (especialmente las hojas y flores) o cocinadas de diversas maneras.
- Ornamentales: Se trata de árboles muy interesantes y de formas atractivas. Admite muy bien las podas. Se pueden utilizar como árboles de sombra, como setos, pantalla visual y auditiva, incluso como cortavientos. Muchas especies, sobre todo los "árboles botella" son muy interesantes como ejemplares aislados.
- La leña proporciona un combustible aceptable, especialmente para cocinar. Ligera, con una densidad media de 0.6 y un poder calorífico de 4.600 kcal/kg.
- La madera, frágil y blanda apenas tiene otro interés que la elaboración de carbón vegetal o pulpa de papel, de excelente calidad en ambos casos.
- Depuración de Aguas: Las semillas son de mucha utilidad como uno de los mejores floculantes naturales conocidos y se emplean ampliamente en la depuración y purificación de aguas fluviales y aguas turbias. También se emplea en la clarificación de miel y del jugo de la caña de azúcar.
- Aceite: La semilla de Moringa contiene un 35 % de aceite. Es un aceite de muy alta calidad, poco viscoso y dulce, con un 73 % de ácido oleico de calidad, por tanto similar al aceite de oliva. Empleado en cocina, no se vuelve rancio, muy bueno como sazonador de ensaladas. También puede tener interesantes aplicaciones en lubricación de mecanismos y fabricación de jabón y cosméticos. Este aceite arde sin producir humo, es apto como combustible para lámparas.
- Forraje para animales: Las hojas de Moringa constituyen uno de los forrajes más completos que se puedan imaginar. Muy ricas en proteína, vitaminas y minerales y con una palatabilidad excelente las hojas son ávidamente consumida por todo tipo

de animales: Rumiantes, cerdos, aves, incluso carpas, tilapias y otros peces herbívoros.

- Fuente de Hormonas Promotoras de Crecimiento Vegetal: obtenidas a partir de extracto de hojas y tallos jóvenes. El principio activo es la Zeatina, una hormona vegetal del grupo de las Citoquininas. También es interesante hacer notar que las hojas de Moringa, incorporadas directamente al suelo previenen del ataque de ciertas plagas (*Pythium debaryanum*).

En esencia se trata de dos especies agroforestales multipropósito que deben considerarse como una opción viable para la recuperación de suelos tropicales con problemas de erosión.

#### **4.3. LA DEGRADACIÓN DEL SUELO, TÉCNICAS, OBRAS DE CONSERVACIÓN Y RECUPERACIÓN**

El valor irremplazable del suelo como medio de producción es ampliamente reconocido por los especialistas en la materia; de hecho la degradación de los suelos se define como “un proceso que reduce la capacidad actual y potencial del suelo para producir cuantitativa y cualitativamente bienes y servicios” (FAO, 1999); esta degradación se origina por la ruptura del equilibrio del ecosistema generada en forma natural por la acción de los procesos intempéricos físicos, químicos y biológicos, y de manera inducida por la acción antrópica y tecnógena (Palacios y Gama, 1994).

En efecto, esta degradación presenta dos fenómenos distintos, ya que el intemperismo natural genera una masa inconsolidada de partículas (material secundario del suelo) que queda expuesta a procesos de erosión hídrica y eólica, cuyos efectos en condiciones de relieve y en la longitud del tiempo geológico modifican atenuada o catastróficamente el paisaje y a la par forman suelos sedimentarios en las partes bajas, se trata entonces de un fenómeno pedogenético.

En contraste, la destrucción de recursos forestales y la sobreexplotación de suelos agrícolas con deficiente uso y manejo, ha provocado desde el nacimiento de la agricultura, la pérdida de más de dos mil millones de hectáreas de suelos potencialmente productivos (FAO, 1999), lo que representa casi la mitad de los suelos cultivados hoy día en el planeta; mismos que están sujetos a degradación por las actividades tecnológicas de los últimos años (Lugo, 1984).

En el Primer Simposio Nacional sobre la Degradación del Suelo llevada a cabo en 1990, se consideraron cinco grupos de procesos degradatorios: 1) la erosión (hídrica y eólica), 2) la degradación física (compactación y cementación), 3) la degradación química (salinización y des-basificación), 4) la degradación biológica (des-humificación) y 5) la contaminación (antrópica). Estos procesos conducen a la pérdida de la productividad del suelo y sus efectos se miden en unidades apropiadas, por ejemplo la pérdida de suelo por erosión hídrica o eólica se cuantifica en t/ha/año o en mm año<sup>-1</sup>; la compactación en gcm<sup>-3</sup>, la salinización en dS/cm/año, la contaminación con elementos tóxicos en ppm año<sup>-1</sup> y la disminución de humus en porcentaje anual. Actualmente el diagnóstico y medición puntual de los mismos se lleva a cabo mediante observaciones directas, teledetección y métodos paramétricos, sin que aún existan modelos matemáticos para predecir correctamente la degradación de los suelos.

En el panorama nacional existe un severo deterioro de los ecosistemas, Martínez y Rubio (2001) señalan que en México se pierden anualmente un promedio de 365 millones de toneladas de suelo productivo, y que cada año esta cifra aumenta debido a la deforestación y pérdida de cobertura vegetal.

El relieve accidentado, el clima, la destrucción de la cubierta vegetal, técnicas inapropiadas de producción intensiva y la creciente presión demográfica contribuyen a que gran parte del territorio nacional sea susceptible a la hidro-erosión, proceso que actualmente afecta a un 75% de los suelos del país y que avanza con mayor rapidez que la velocidad con que se aplica la velocidad para controlarla (Anaya, 1994). A la fecha no existen modelos matemáticos adecuados para los suelos de México que permitan predecir la erosión. Así mismo se debe señalar que los aspectos ecológicos, sociales, culturales y

económicos de cada región de la República Mexicana dificultan en forma notable la aplicación de las tecnologías en la materia.

Además de la hidro-erosión, en México existen otras formas de degradación de los suelos, como la compactación y cementación que en diversos grados afecta al 30% de la superficie total del territorio nacional (Flores,1991); los procesos de salinización y sodificación que afectan a cerca de 500,000 hectáreas de nula o muy difícil recuperación (Szabolcs, 1989), y la contaminación edáfica resultado del crecimiento demográfico e industrial, que ha motivado el uso intensivo de aguas residuales no tratadas con fines agrícolas, provocando la acumulación de sales, sodio, boro, metales pesados y detergentes en los suelos, con lo cual se altera de manera drástica la relación natural suelo-agua-plantas (Méndez, *et al.* 1990). Además el uso excesivo de productos agroquímicos (fertilizantes, insecticidas y herbicidas), en las regiones agrícolas más tecnificadas, está contaminando los suelos por acumulación, y su flujo contamina a ríos, lagos y mantos freáticos; se trata entonces de un problema tóxico que daña a la población microbiana del suelo, a la fisiología de cultivos, a los animales y al hombre.

La erosión según Bergsma (1983) es un término genérico para indicar pérdidas de suelo, y de esta pérdida deben diferenciarse dos formas: *la erosión geológica*, la cual se presenta de manera natural y se observa cuando el suelo que se pierde por arrastre es igual o menor al suelo formado; y la *erosión acelerada*, la cual se presenta cuando se rompe el equilibrio del hábitat y es mayor el suelo arrastrado que el suelo formado. (León, 2006).

La erosión de suelos ha existido en toda la historia de nuestro planeta, tal es el caso que a nivel mundial se han erosionado 2 000, 000, 000 de hectáreas, es decir, un cuarto de las tierras cultivables (León, 2006). No obstante, cabe resaltar que si bien el fenómeno de la erodabilidad de los suelos es natural, también se presenta por acción de las actividades antrópicas, las cuales han tenido en los últimos años una importante participación en la pérdida de suelos y en general del deterioro del ambiente.

Para nuestro país no es menos grave el problema, y aunque se considera que los suelos de la zona subtropical, tienen cierta resistencia en su estado natural a la erosión; lo

cierto es que al ser sometidos al cultivo y ganadería son particularmente vulnerables a la misma y consecuentemente a su degradación y a la reducción de su fertilidad.

Por otro lado, desde 1945 a 1997, se han realizado siete evaluaciones nacionales de la erosión hídrica y sus resultados indican que los porcentajes varían del 40 al 95 % aproximadamente; la evaluación más reciente fue realizada por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en 2001-2002, e indica que la erosión hídrica fue del orden de 37 % y la eólica del 15%.

#### **4.3.1. Practicas vegetativas y mecánicas para el control de la erosión**

La evaluación de las prácticas agroproductivas, ha ido acompañada de técnicas de conservación de suelos, una de estas técnicas se basa en el uso y manejo de prácticas silvícolas, en efecto, el establecimiento de determinadas especies vegetales en suelos de intensa explotación agrícola permite hacer un uso intensivo y racional del suelo implementando dos o más cultivos en un año agrícola con especies agroforestales con diversos propósitos para beneficio de la economía familiar.

Estas prácticas se realizan con la utilización de especies agroforestales y en muchos casos en combinación con las mecánicas: Ejemplo: los abonos verdes con surcado al contorno o terrazas de absorción con cultivos de cobertera o un sistema silvopastoril en combinación con terrazas individuales (Sánchez y Llerena, 2006). Las prácticas vegetativas en combinación con alguna práctica de conservación de suelo tienen las siguientes ventajas:

- 1) Impedir la remoción excesiva de partículas de suelo gracias al sistema radicular que proporcionan las especies agroforestales.
- 2) La cobertura vegetal genera condiciones de humedad y microclimas que favorecen la actividad biótica en la rizósfera de las especies agroforestales.
- 3) Especies agroforestales leguminosas son capaces de fijar nitrógeno al suelo incrementando su nivel de fertilidad.
- 4) La presencia de especies agroforestales cultivadas, mejora la estructura del suelo y con ello su capacidad de aireación y de conductividad hidráulica.

A continuación se indican las prácticas vegetativas y mecánicas más sobresalientes para el control de la erosión y se hace referencia a la práctica de terrazas individuales utilizada en este trabajo de investigación.

**Tabla 4.** Prácticas vegetativas y mecánicas más importantes para el control de la erosión.

<b>Prácticas vegetativas</b>	
<b>Práctica</b>	<b>Breve descripción</b>
Rotación de cultivos	Es la sucesión de diferentes cultivos anuales en ciclos continuos sobre un área de terreno determinada.
Cultivos en fajas	Consiste en el cultivo de terrenos de pendiente de 2 al 15 % en fajas alternadas y de anchura variable con plantas y cultivos tupidos, siguiendo un programa rotacional.
Abonos verdes	Son plantas que se siembran en un terreno con la finalidad de incorporarlas en el suelo durante la época propicia de su desarrollo vegetativo, generalmente al iniciarse la floración.
Cultivos de cobertura	Son leguminosas, cereales o una mezcla apropiada, que se siembra para cubrir el terreno con un alto porcentaje de follaje que protege al suelo del impacto de las gotas de la lluvia y del viento.
<b>Prácticas mecánicas</b>	
Terrazas	Las terrazas son terraplenes formados entre bordos de tierra o la combinación de bordos y canales, construidos en sentido perpendicular a la pendiente del terreno.

Subsoleo a nivel	Consiste en realizar roturaciones en suelos con presencia de capas duras con implementos integrados a maquinaria pesada con objeto de romperlas y poder plantar especies forestales.
Sistema zanja-bordo	Consiste en el afloje, excavación o extracción y remoción de suelo realizado a cielo abierto, en áreas previamente localizadas y trazadas a curvas de nivel.
Tinas ciegas	Son una variación del sistema zanja-bordo, que consiste en interrumpir la continuidad de la construcción de las zanjas, dejando un tramo ciego cuya distancia depende de las condiciones de escurrimiento de la zona en cuestión.
<b>Prácticas agroproductivas</b>	
Abonos orgánicos	Son todos aquellos residuos de origen animal o vegetal, que al ser incorporados al suelo, son degradados y proporcionan nutrientes a las plantas.
Labranza de conservación	Es cualquier sistema de labranza en el cual al menos 30 % de la superficie del suelo esté cubierta por residuos después de la siembra, para reducir la erosión.

**Fuente:** Sánchez y Llerena (2006).

#### 4.3.2. Terrazas individuales

Las terrazas son terraplenes formados entre bordos de tierra o la combinación de bordos y canales, construidos en sentido perpendicular a la pendiente del terreno (Sánchez y Llerena, 2006).

#### **4.3.2.1. Objetivo de las terrazas**

- Reducir la erosión del suelo.
- Aumentar la infiltración del agua en el suelo para que pueda ser utilizada por los cultivos.
- Disminuir el volumen de escurrimiento que llega a las construcciones aguas abajo.
- Desalojar las excedencias de agua superficial a velocidades no erosivas.
- Reducir el contenido de sedimentos en las aguas de escorrentía.
- Mejorar la superficie de los terrenos, acondicionándola para las labores agrícolas.

Para que un sistema de terrazas sea efectivo debe usarse en combinación con otras prácticas, tales como: surcado al contorno, cultivos en fajas, rotación de cultivos y un manejo del suelo ajustado a su capacidad de uso; además, se requiere de un sistema completo de manejo del agua, que debe incluir cauces empastados, desagües subterráneos, drenes y estructuras de desviación de los excedentes que forman la escorrentía (Hudson, 1982).

#### **4.3.2.2. Adaptabilidad de las terrazas**

La adaptación de las terrazas a una determinada localidad según Sánchez y Llerena (2006) depende de varios factores, que se pueden presentar en forma aislada o conjunta y los cuales se exponen a continuación:

- a) **Clima.** Las terrazas se adaptan a condiciones variadas de clima, lo que difiere es el tipo de sistema a utilizar. Así se tienen terrazas que almacenan el agua cuando la precipitación es menor de 750 mm y terrazas que desalojan los excesos de agua, cuando la precipitación es abundante y las condiciones del suelo lo requieran.
- b) **Erosión:** Cuando las terrazas se utilizan para recuperar terrenos fuertemente erosionados su construcción es costosa, el mantenimiento es constante y las operaciones de labranza son, en general, difíciles.

- c) Topografía: Al aumentar la pendiente, la construcción, el mantenimiento de las terrazas y las dificultades de laboreo incrementan el costo hasta un punto tal, que en ocasiones esos gastos sobrepasan a los beneficios que pudiera obtenerse en un tiempo razonable.
- d) Pedregosidad: Los suelos extremadamente pedregosos no permiten una construcción práctica y económica de las terrazas con maquinaria; sin embargo, su construcción es factible en áreas donde existe disponibilidad de mano de obra y se satisfacen los aspectos antes indicados.
- e) Suelos: Las características del suelo determinan el tipo de terraza y de desagüe que se debe utilizar, así como la profundidad de corte tolerable y el espaciamiento que debe existir entre las terrazas.
- f) Generalmente, cuando los suelos son profundos y permeables, se puede construir cualquier tipo de terraza, en cambio si los suelos son poco profundos e impermeables, es necesario establecer terrazas que tengan un gradiente que permita la salida de los excesos de agua hacia un cauce natural o artificial debidamente protegido.
- g) Disponibilidad de maquinaria o mano de obra: Debido a los movimientos de tierra que implica la construcción de terrazas, algunas veces en las áreas de corte afloran a la superficie materiales no fértiles que pueden hacer prohibitivo algún sistema de terrazas.

#### **4.3.2.3. Clasificación de terrazas**

Los sistemas de terrazas se clasifican según la condición de escurrimiento, el tipo de sección transversal y la clase de desagüe. Como se detalla a continuación:

Clasificación de terrazas según la condición de escurrimiento. La agrupación está en función de las características pluviales y de suelos de cada región; de acuerdo a Sánchez y Llerena, (2006) se consideran dos tipos:

*Terrazas con declive o de drenaje.* Esta terraza se utiliza en áreas donde la precipitación es abundante o las características de permeabilidad y profundidad de los

suelos propician la acumulación excesiva que es necesario desalojar hacia una salida natural o artificial debidamente protegida.

*Terrazas a nivel.* Generalmente se recomiendan en áreas con precipitaciones bajas a moderadas, del orden de 750 mm anuales, o donde los suelos son profundos, con buena permeabilidad y capaces de absorber toda el agua de lluvia. Este tipo de terraza se construye con un bordo y canal amplio a nivel, de manera que el agua se almacene a lo largo de la terraza. Algunas veces se cabecean los extremos para que en suelos permeables el agua se infiltre por medio del drenaje interno.

#### **4.3.2.4. Criterios de diseños de terrazas**

Para el diseño de las terrazas, es necesario considerar los aspectos siguientes:

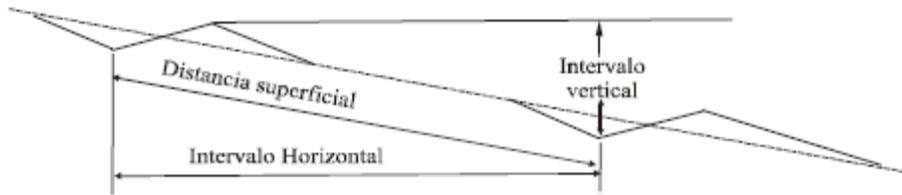
- Espaciamiento entre terrazas.
- Características del canal.
- Forma de la sección transversal.

La influencia de cada uno de los aspectos anteriores se discuten a continuación:

*Espaciamiento entre terrazas.* El espaciamiento entre terrazas depende principalmente de la pendiente; sin embargo también influye la precipitación pluvial, la sección transversal de la terraza, los implementos agrícolas que se van a utilizar y el tamaño de las parcelas (Sánchez y Llerena, 2006).

*Cálculo del espaciamiento entre terrazas.* El espaciamiento se puede medir utilizando la diferencia de nivel entre ellas, denominado intervalo vertical (IV) o considerando la distancia horizontal entre ellas, que se conoce como intervalo horizontal (m).

Generalmente el intervalo horizontal se mide sobre el terreno (distancia superficial), sobre todo en pendientes pequeñas donde la diferencia entre las dos mediciones es despreciable. En pendientes fuertes sí debe utilizarse el intervalo horizontal, ya que la distancia superficial puede provocar errores considerables (Hudson, 1982).



**Figura 3.** Mediciones usadas en el espaciamiento entre terrazas.

El procedimiento para calcular el espaciamiento entre terrazas considera las siguientes ecuaciones:

La ecuación que considera la pendiente y la precipitación anual, para calcular el intervalo vertical utiliza la siguiente fórmula.

$$IV = \left( 2 + \frac{P}{3 \text{ o } 4} \right) (0.305)$$

Donde: IV es el intervalo vertical (m); P es la pendiente del terreno (%); 3 es un factor que se utiliza en áreas donde la precipitación anual es menor de 1,200 mm; 4 es el factor que se utiliza en áreas donde la precipitación anual es mayor de 1,200 mm; y 0.305 es el factor de conversión de pies a metros. Los valores del intervalo vertical aparecen en la tabla 3.

En caso de utilizar el intervalo horizontal en lugar del vertical se emplea la ecuación 2:

$$IH = \left( \frac{IV}{P} \right) * 100$$

Donde: IH es el intervalo horizontal (m); IV es el intervalo vertical (m); y P es la pendiente del terreno (%). Los valores del intervalo horizontal para diferentes pendientes se muestran a continuación. (Sánchez y Llerena, 2006).

**Tabla 5.** Espaciamiento entre terrazas al considerar la pendiente (S) y la precipitación.

S %	Precipitación			
	Intervalo vertical		Intervalo horizontal	
	< 1, 200	> 1, 200	< 1, 200	> 1, 200
2	0.81	0.76	40.50	38.0
4	1.02	0.91	25.50	22.75
6	1.22	1.07	20.33	17.83
8	1.42	1.22	17.75	15.25
10	1.62	1.37	16.2	13.70
12	1.83	1.52	15.25	12.66
14	2.03	1.68	14.50	12.00
16	2.24	1.83	14.00	11.43
18	2.44	1.98	13.55	11.00
20	2.64	2.13	13.20	10.65
22	2.84	2.28	12.90	10.36
24	3.05	2.44	12.70	10.16
26	3.25	2.59	12.50	9.96
28	3.45	2.74	12.32	9.78
30	3.66	2.90	12.20	9.67
32	3.86	3.05	12.03	9.53
34	4.06	3.20	11.94	9.41

36	4.27	3.35	11.86	9.30
38	4.47	3.50	11.76	9.21
40	4.67	3.66	11.67	9.15
50	5.69	4.42	11.38	8.84

## CAPÍTULO V: MATERIALES Y MÉTODOS

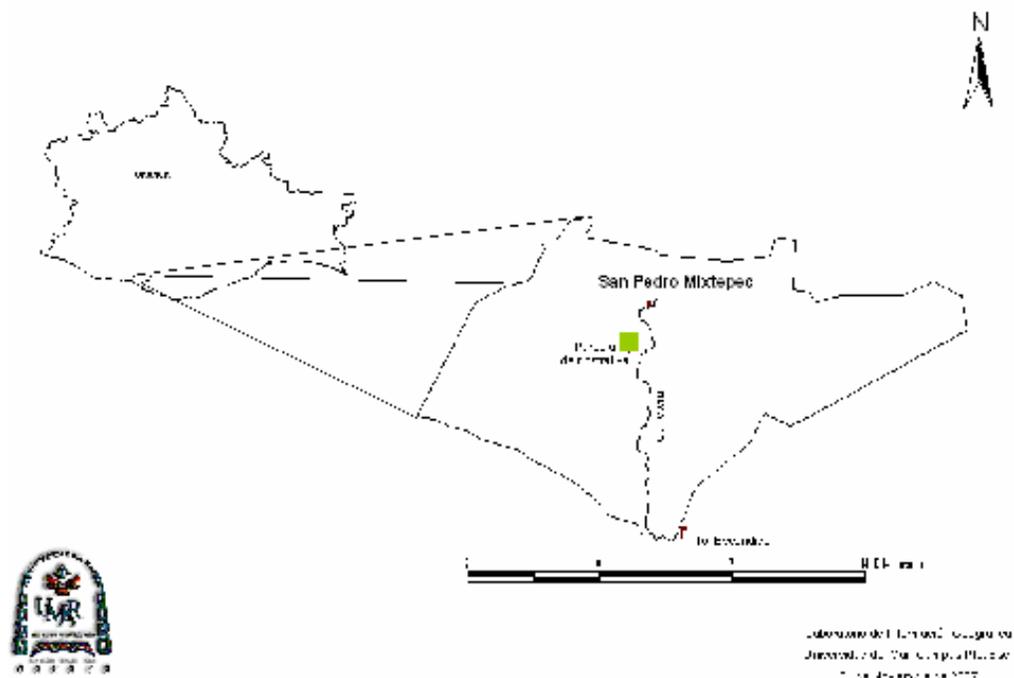
### 5.1. ESTUDIO DIAGNÓSTICO DEL TERRENO

#### 5.1.1. Localización y características medioambientales del área de estudio

La cuenca hidrográfica Río Colotepec se localiza en terrenos de los distritos de Juquila, Pochutla y Miahuatlán, se extiende desde el parteaguas de la Sierra Madre del Sur hasta la línea de costa; ocupa 3.77% de la superficie estatal; colinda al norte y oeste con la cuenca Río Atoyac (A) de la Región Hidrográfica veinte (RH-20); al este con la cuenca Río Copalita y otros (B) de la RH-21; y por último al sur, con el Océano Pacífico. La microcuenca San Pedro Mixtepec se localiza entre las coordenadas 97°05' longitud oeste, 16°59' latitud norte, está delimitada por los Cerros del Zopilote, del Ocote, de la Campana y del Águila. (INEGI, 2004).

La parcela experimental se localiza entre las coordenadas 15° 57'42.0" Latitud Norte y 097° 05'20.1" Longitud Oeste con una altura de 196 msnm (figura 4).

#### MICRO LOCALIZACIÓN DE LA PARCELA EXPERIMENTAL EN SAN PEDRO MIXTEPEC OAX.



**Figura 4.** Ubicación de la parcela experimental en San Pedro Mixtepec.

El área queda comprendida dentro del complejo Xolapa caracterizado por roca madre granítica y sobreposición de potentes espesores de rocas metamórficas del tipo gneis (Tolson, 1998). En términos geohidrológicos se trata de sustratos semi-impermeables característica que proviene de las rocas graníticas.

La cubierta vegetal ha sido perturbada por actividades agro-productivas, por lo que actualmente predomina la vegetación secundaria. Estos suelos están sujetos a procesos hidro-erosivos en época de lluvias, por lo que las zonas deforestadas de la microcuenca presentan el problema de degradación del suelo.

#### 5.1.1.1. Clima

Según la clasificación climática de Köppen modificada por García (1971) el clima en la región es cálido sub-húmedo con una temperatura media anual de 28°C y con lluvias en los meses de mayo a octubre. La precipitación anual es de 600 a 1300 mm. Las lluvias son de tipo torrencial y alcanzan su valor máximo en septiembre, cuando se recibe la influencia ciclónica que provoca el aumento de la precipitación pluvial. (INEGI, 2004).

#### **5.1.1.2. Vegetación**

El tipo de vegetación predominante corresponde a la selva baja caducifolia (SBC), vegetación riparia, selva mediana y zona de transición. La flora de la región está representada por la selva baja caducifolia, la cual es la comunidad más rica y diversa en especies y la que mayor extensión ocupa, contiene de 30 a 50 especies en una superficie de 0.1 hectáreas. En las áreas donde los suelos son pobres en mantillo orgánico, llamado comúnmente tepetates, se asocia con la sabana que se presenta en forma de parches incrustados en la selva baja caducifolia. La vegetación se caracteriza fisonómicamente por la baja estatura de los componentes arbóreos (normalmente de 4 a 12 m), los cuales se encuentran en un solo estrato, y por la pérdida de las hojas durante un período de seis meses aproximadamente. Los troncos de los árboles son generalmente cortos, torcidos y ramificados cerca de la base, o por lo menos en la mitad inferior y las copas muy extendidas y poco densas. El estrato herbáceo y arbustivo es abundante en la época de lluvias, que es cuando retoñan y germinan muchas especies de hierbas, pero es escaso en la temporada de seca. (INEGI, 2004; García *et al*, 2004).

#### **5.1.1.3. Geología**

De acuerdo con Servicio Geológico Mexicano, la geología del lugar presenta rocas metamórficas pertenecientes al complejo xolapa, de edad precámbrica, constituidas por

gneis granítico de facies anfibolita, estas rocas están intrusionadas por rocas granodioríticas del terciario y corresponden al batolito de río verde, sobre este paquete de rocas cristalinas en los valles intermontanos se encuentra suelo de color pardo rojizo poco desarrollado con una profundidad máxima de un metro, de edad cuaternaria que presenta una textura gruesa, con 80 % de arena. La mineralogía de estas arenas está constituida por cuarzo, feldespatos, óxidos de hierro (De Scerna, 1965).

#### **5.1.1.4. Hidrología**

En general, el régimen de lluvias es en verano, en promedio se registran láminas de precipitación total anual del orden de 1 300 mm, que significan un volumen de 4.868 miles de metros cúbicos ( $Mm^3$ ), de los cuales escurren  $1\,139.3\ m^3$  que equivalen al 23.4% del volumen total. Dentro de la red hidrográfica de la cuenca destaca el río Colotepec, el cual nace en la Sierra Madre del Sur a 2 300 msnm, baja con rumbo suroeste en trayectoria sinuosa y de fuerte pendiente hasta desembocar al Océano Pacífico, la longitud es de aproximadamente 100 km, medidos desde su nacimiento hasta Santa María Colotepec. De acuerdo a los datos hidrométricos de la Estación Hidrométrica La Ceiba, este río transporta volúmenes anuales del orden de  $905.05\ Mm^3$  (INEGI, 2004) que se traducen en un gasto medio anual de  $48.67\ m^3\ seg^{-1}$ . Dentro de la microcuenca se encuentra el río de las Vacas y el río Sangre, el uso principal a que se destina el agua de éstos es el consumo humano (INEGI, 2004).

#### **5.1.1.5. Suelos**

La mayor parte de los suelos de la cuenca presentan fase lítica, son regosoles eútricos, algunos con fase química sódica y salino-sódica; que están distribuidos en el extremo oeste de la cuenca e incluyen zonas lacustres. En general los suelos del alto y

mesorelieve son someros y lateríticos y se caracterizan por su vocación forestal. La escorrentía mayor de 30 se presentan en la zona serrana, donde los registros de lluvia alcanzan láminas mayores a 2 000 mm, imperan rocas de baja permeabilidad y vegetación densa; las áreas con valores de escurrimiento que caen dentro del intervalo de 20 a 30% abarcan la mayor parte de la cuenca, los factores que se conjugan para determinar estos valores son la baja capacidad de infiltración o permeabilidad que domina en las rocas que forman la sierra, la densa vegetación y láminas de precipitación media anual mayores de 1 000 mm; en la zona costera los porcentajes de escurrimiento son menores de 20, la permeabilidad es alta y en ocasiones media, la vegetación es de baja densidad y la precipitación varía de 600 a 1 300 mm (INEGI, 2004).

#### **5.1.1.6. Principales actividades agro-productivas**

Las principales actividades agro-productivas en el área de estudio son las siguientes: Agricultura (30%), Ganadería (40%), Industria Forestal (10%), Turismo (20%) (INEGI, 2004).

#### **5.1.2. Selección del sitio**

Para la selección de la parcela experimental, se llevó a cabo una inspección y caracterización visual del terreno más idóneo para el establecimiento de la misma, para lo cual se consideraron los siguientes indicadores:

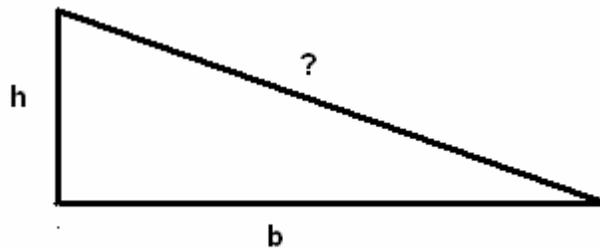
- a) Grado de deforestación
- b) Pendiente del terreno
- c) Precipitación pluvial.

- d) Características físicas del suelo (textura, estructura, densidad aparente y contenido de materia orgánica).

### 5.1.2.1. Determinación de la pendiente

La pendiente se determinó como una relación porcentual de los componentes vertical y horizontal del relieve expresándose matemáticamente mediante la fórmula siguiente:

$$P = (h/b) \times 100 \%$$



**Figura 5:** Trazo que indica la forma en que se determinó la pendiente del terreno.

En campo, su valoración se apoyó con un clinómetro de Suunto, según lo indica (Villanueva, 2005).

### 5.1.2.2. Determinación de algunas propiedades físicas y químicas del Suelo

Estas determinaciones se basaron en la metodología señalada por la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad, clasificación de suelos, estudios, muestreo y análisis, así como en la metodología señalada por el Laboratorio de Salinidad del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (Richards, 1980), en este contexto los análisis físicos consistieron en la determinación de los siguientes parámetros:

- a) Densidad aparente por el método del hidrómetro de Bouyoucos.
- b) Textura por el método granulométrico y utilizando triángulo de texturas.
- c) Color por medio de tablas de color Münsell.

Por su parte las determinaciones químicas consistieron en el análisis de los siguientes parámetros:

- 1) pH. Se determinó con un potenciómetro marca Hanna
- 2) Conductividad eléctrica. Su determinación se hizo con un conductímetro.
- 3) Materia orgánica por el método de incineración.
- 4) Determinación de cationes y aniones por el método colorimétrico.
- 5) Calcio y magnesio por titulación con etilen diamino tetra-acetato o ion versenato.
- 6) Carbonatos y bicarbonatos por titulación con ácido sulfúrico.
- 7) Cloruros por titulación con nitrato de plata.
- 8) Sulfatos mediante un espectrofotómetro Perkin-Elmer.
- 9) Sodio y potasio por flamometría, utilizando un aparato de absorción atómica.
- 10) Capacidad de intercambio catiónico mediante centrifugado y lavado con acetato de bario.
- 11) Residuo seco evaporado, secando alícuotas de extractos de suelo en estufa a 105 grados centígrados.
- 12) Residuo seco calcinado, secando alícuotas de extractos de suelo en mufla a 600 grados centígrados.

### 5.1.2.3. Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

El intercambio de cationes del suelo es factor fundamental para la nutrición vegetal, por lo tanto su correcta determinación reviste especial relevancia. Entre los métodos comúnmente utilizados para la medición de la capacidad de intercambio catiónico (CIC), está el que emplea el acetato de bario (León, 2006).

La capacidad de intercambio catiónico permite analizar:

- 1) La disposición de elementos nutrimentales para las raíces de las plantas, por lo que su correcta determinación tiene especial importancia en la nutrición vegetal.
- 2) Los procesos de fertilización química y encalado de los suelos para corregir acidez.
- 3) La estabilidad estructural de las arcillas, donde los procesos de floculación y dispersión coloidal que generan agregación o ruptura de la estructura del suelo, son generados por dos iones antagónicos, el calcio y el sodio respectivamente.

La capacidad de intercambio catiónico se determina por el método de acetato de bario. En laboratorio el proceso de lavado de una muestra de suelo seco primero con una solución de acetato de bario, originó que todos los cationes adsorbidos fueran reemplazados por iones  $Ba^{+}$ . Posteriormente el suelo se trató con una solución de sulfato de magnesio. Los iones  $Mg^{2+}$  reemplazaron a los iones bario adsorbidos por el suelo. La cantidad de iones  $Ba^{+}$  presentes en la solución de lavado, se consideró como medida de la capacidad de intercambio catiónico del suelo.

## 5.2. ESTABLECIMIENTO DE LA PARCELA EXPERIMENTAL

La parcela demostrativa se localiza a los  $15^{\circ} 57'42.0''$  Latitud Norte y  $97^{\circ} 05'20.1''$  Longitud Oeste; al este de la comunidad “Los Nanches” perteneciente al Municipio de San Pedro Mixtepec.

El lote experimental de escurrimiento, se estableció en un terreno con pendiente de 35 %, calculada con un clinómetro de Suunto y corroborada con el aparato A (figura 6<sup>a</sup>). Sus medidas son de 2.5 metros de ancho por 5 metros de largo, lo que arrojó una superficie de (12.5 m<sup>2</sup>) a partir de los cuales se estimó el porcentaje de escurrimiento y de erosión del

sitio. El lote se estableció de norte a sur coincidiendo con la circulación del agua en el sentido aguas arriba-aguas abajo de la micro-cuenca. Así mismo, se cercó con tablas a una altura de 30 cm, y en su perímetro se estableció un canal derivador que se conectó en su extremo inferior con un recipiente de 100 litros de capacidad (Figura 6b), en el que se captaron los sedimentos producto de la remoción. El objetivo del lote de escurrimiento fue el de generar datos para alimentar la ecuación mediante la cual se determinó el porcentaje de erosión.

El dato de la masa de sedimento obtenida, sirvió para alimentar la ecuación de pérdida de suelo (método de USLE). Esto se realizó antes del periodo de lluvias a fin de captar los sedimentos de las primeras lluvias.

### 5.2.1. Levantamiento topográfico del terreno

Se realizó con cinta, cadenamamiento y utilización de un teodolito, a efecto de deslindar y obtener la superficie exacta del lote experimental y diseñar el sistema de terrazas (Raymond y Kelly, 1982).



a)

b)

**Figura 6.** a) Determinación de la pendiente del terreno, b) Establecimiento del lote de escurrimiento

### 5.2.2. Cálculo de la erosión

La erosión se calculó mediante el método USLE establecido por Wischmeier y Smith, citado por Hudson (1982) que considera la ecuación:

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

Donde:

A = pérdida promedio de suelos ( $\text{ton ha}^{-1}$ ).

R = Erosividad de la lluvia ( $\text{ton ha}^{-1}$ ).

K = Erodabilidad del suelo ( $\text{ton ha}^{-1}$ ).

L = Largo de la pendiente (m).

S = Magnitud de la pendiente (%).

C = Cubierta vegetal y manejo de cultivos.

P = Prácticas de conservación.

La estimación de los volúmenes de pérdida de suelo por efecto de la erosión, se realizó con base en el cálculo de los índices de cada componente de la ecuación.

La erosividad R se calculó utilizando la expresión de Lombardi Neto y Moldenhauer (1980); citado por (Mattos, 1999).

$$R = 6.866 \frac{(p^2)^{0.85}}{P}$$

Donde:

R = Índice medio de erosividad anual

p = Precipitación media mensual

P = Precipitación media anual

La erodabilidad K representa la susceptibilidad del suelo a la acción erosiva y está en función de las características físicas de los suelos: textura, permeabilidad, capacidad de filtración, estructura, granulometría, contenido de materia orgánica, etc.

El servicio de conservación de suelos de los Estados Unidos, (SCS por sus siglas en inglés) clasifica a los suelos de la manera siguiente (Tabla 6):

**Tabla 6.** Clasificación de Suelos, según Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos.

Suelos	Características
A	De bajo potencial de escurrimiento, buena permeabilidad, por lo que la infiltración mantendrá valores altos, aún cuando estén húmedos. Pertenecen a éste grupo los suelos gravosos, gravo-arenosos y arenosos gruesos.
B	Mantienen moderadas velocidades de infiltración y mayores valores de escurrimiento. En este grupo se consideran a suelos arenosos, limo-arenosos con reducida presencia de materia coloidal.
C	En estos suelos la infiltración es lenta, es frecuente la presencia de material muy fino, mezclados con partículas gruesas, a este grupo pertenecen los suelos franco-arcillosos y franco-arcillo-arenosos.
D	Estos suelos son los que presentan mayor potencial de escurrimiento. Se considerarán como suelos de este grupo a los de grano fino, que forman capas prácticamente impermeables por lo que la infiltración será muy lenta. En este caso se considerarán a los suelos arcillosos.

En función de lo anterior los valores que adquiere la Erodabilidad del suelo (**K**) son los siguientes (Tabla 7):

**Tabla 7.** Rango de valores para Erodabilidad del suelo (K).

TIPO DE SUELO	RANGO DE VARIACION DE K
A	0.16 - 0.23
B	0.13 - 0.38
C	0.13 - 0.18
D	0.07 - 0.12

El factor topográfico **L** se obtuvo mediante la medición de la pendiente utilizando un longímetro, la cual se expresa en metros.

El factor **S** que corresponde a la pendiente del terreno expresada en porcentaje, se obtuvo mediante la ayuda de un clinómetro de Suunto.

Los factores de uso y manejo del suelo **C** y práctica conservacionista **P**, están relacionados entre sí y deben ser evaluados en forma conjunta con base en cartas de uso del suelo a una escala que permita la distinción entre las principales formas de uso y ocupación agrícola.

Para la determinación de **C** se consideraron los siguientes valores referenciales (Tabla 8).

**Tabla 8.** Valores referenciales del índice de factor de uso y manejo del suelo C.

COBERTURA VEGETAL	C
Bosque no intervenido	0.001
Bosque intervenido	0.34
Tierras erosionadas con escasa vegetación	0.8
Suelo desnudo	1
Cultivos extensivos en hileras, ej. maíz	0.5
Yuca y batata 1er año	0.2-0.8
Palmera, café, cacao	0.1-0.3
Pastos	0.07
Hortalizas	0.3

De igual manera para determinar el factor prácticas de conservación **P**, sirvieron de referencia los siguientes valores (Tabla 9):

**Tabla 9.** Índice de práctica conservacionista.

TECNICA	FACTOR P
Curvas de nivel (pendientes entre 5 % y 20 %)	0.1 - 0.7
Bandas antierosivas de 2 a 4 m (pendientes entre 5 % y 25 %)	0.1- 0.3
Protección con paja	0.01
Terrazas de 80 cm combinadas con curvas de nivel (pendientes entre 15 % y 30 %)	0.1

### 5.2.3. Cálculo del escurrimiento superficial

El escurrimiento superficial depende de la cantidad e intensidad de la lluvia, la cobertura vegetal tanto herbácea como arbórea, la rugosidad del terreno, la textura y contenido de materia orgánica del suelo y el manejo que se le dé a éste (CONAFOR, 2004).

Para determinar el escurrimiento medio superficial de la microcuenca, se consideró el método señalado por el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América; que establece los siguientes parámetros.

- a) Cantidad e intensidad de la lluvia
- b) Cobertura vegetal
- c) Rugosidad del terreno
- d) Textura y contenido de materia orgánica del suelo
- e) Pendiente
- f) Uso y manejo del suelo

Para la aplicación de este modelo es necesario conocer primero el coeficiente de escurrimiento, el cual se obtiene en base a las características del suelo del área de estudio y de la microcuenca (textura, cubierta vegetal, topografía). De acuerdo a las características de la microcuenca y el tipo de cultivo; se obtuvo el coeficiente de escurrimiento de 0.22 de acuerdo a la tabla de valores para el coeficiente de escurrimiento del Manual de Conservación de Suelo y Agua CP. S.A.R.H. (1975).

Para la determinación del volumen de escurrimiento se tomaron en cuenta las características del terreno (textura, cubierta vegetal y topografía) además se cotejó con la tabla de escurrimiento en el Manual de Conservación del Suelo y Agua del CP. S.A.R.H. (1975).

Para determinar el cálculo de escurrimiento máximo de la microcuenca y el sitio del proyecto se utilizó el método del Servicio de Conservación de Suelos del USDA. (CONAFOR, 2004).

Así mismo se consideraron curvas numéricas que dependen del tipo de suelo, de la condición hidrológica de la cuenca, del uso y manejo del suelo, así como de su condición de humedad. Igualmente es necesario conocer los valores de la precipitación pluvial media anual, el área de drenaje y su coeficiente de escurrimiento, de tal manera que se tomaron como base los datos proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (CNA) de la estación meteorológica “La Ceiba”. Con estos elementos se realizó el cálculo del escurrimiento medio a partir de las curvas numéricas mediante las relaciones que se detallan en párrafos subsecuentes.

El valor de las curvas numéricas está determinado por los siguientes factores:

- 1) **Suelo.** De acuerdo al contenido de materia orgánica y a la textura del suelo, será el grado de incidencia en el escurrimiento, como se detalla en la tabla 10:

**Tabla 10.** Grupos de suelos de acuerdo a sus características de escurrimiento.

<b>Grupo de suelos</b>	<b>Descripción</b>
A	Suelo con bajo potencial de escurrimiento, con arenas profundas, con poco limo y arcilla, permeable con una infiltración básica de 8-12 mm/hr.
B	Suelos con bajo potencial de escurrimiento, arenoso menos profundo y mas agregados que el grupo A con una infiltración básica 4-8 mm/hr.
C	Suelos con alto potencial de escurrimiento, someros con considerable contenido de arcilla con una infiltración básica 1-4 mm/hr.
D	Suelos con alto potencial de escurrimiento como suelos pesados, con alto contenidos de arcillas y suelos someros con materiales fuertemente cementados. Infiltración básica 1 mm/hr.

- 2) **Condición hidrológica y cobertura vegetal.** Este factor considera a la cobertura vegetal como de primordial importancia en la intercepción de la precipitación y la rugosidad que se opone al escurrimiento, de tal forma que se establecen tres clases de cobertura.

Buena > de 75%

Regular entre 50 y 75%

Mala < de 50%

Así como una serie de parámetros para agruparlas con base en el uso del suelo, como se indica en la tabla 11:

**Tabla 11.** Vegetación y Condición Hidrológica

<b>Vegetación</b>	<b>Condición hidrológica</b>
Pastos naturales	Pastos en malas condiciones, dispersos, fuertemente pastoreados, con cobertura vegetal en menos de la mitad del área total. Pastos en condiciones regulares y pastos en buenas condiciones, ligeramente pastoreados y con cobertura vegetal en más de tres cuartas partes del área total.
Áreas boscosas	Áreas en malas condiciones, con árboles dispersos y fuertemente pastoreados, en condiciones regulares moderadamente pastoreados o densamente pobladas y sin pastorear.
Pastizales mejorados	Pastizales mezclados con leguminosas sujetas a un cuidadoso sistema de manejo de pastoreo. Se considera que tienen buenas condiciones hidrológicas.
Rotación de praderas	Praderas densas, moderadamente pastoreadas, usadas a través de una bien planeada rotación de cultivos y se consideran en buenas condiciones hidrológicas; excepto áreas con material disperso y sobrepastoreado.
Cultivos	En buenas condiciones hidrológicas, se refiere a una buena rotación de cultivos (praderas, cultivos tupidos). En malas condiciones hidrológicas se refieren a un manejo de cultivos basado en monocultivos.

- 3) **Uso de suelo.** Es un factor necesario para estimar el escurrimiento superficial, por ello se consideran las diferentes prácticas de manejo a que es sometido. Con estos parámetros se consideró la tabla 12 del Manual de obras y prácticas de protección, restauración y conservación de suelos forestales de la CONAFOR (2004). para obtener la curva numérica que se utilizó en la ecuación.

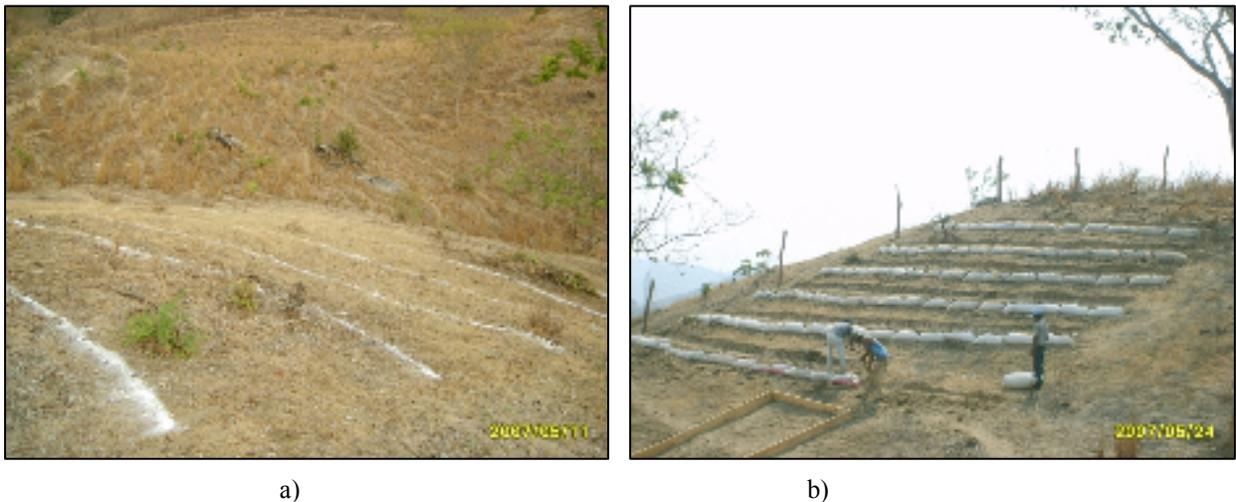
**Tabla 12.** Cuevas numéricas de acuerdo al uso, tratamiento y condición hidrológica del suelo (CONAFOR, 2004).

Uso del suelo	Tratamiento o práctica	Condición hidrológica	Curvas numéricas			
			A	B	C	D
Suelo en descanso	Surcos rectos		77	86	91	94
Cultivos de escarda	Surcos rectos	Mala	71	81	88	91
	Surcos rectos	Buena	67	78	85	89
	Curva a nivel	Mala	70	79	84	88
	Curva a nivel	Buena	95	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 hileras o forraje en rotación	Surcos rectos	Mala	66	77	85	85
	Surcos rectos	Buena	58	72	81	85
	Curva a nivel	Mala	64	75	83	85
	Curva a nivel	Buena	55	60	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
	Curva a nivel	Mala	47	67	81	88
	Curva a nivel	Regular	25	59	75	83
	Curva 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	25	55	70	77
Camino de tierra		Buena	72	82	87	89
Camino pavimentados		Buena	90	90	90	90

### 5.3. CONSTRUCCIÓN DE TERRAZAS

En la parcela experimental se construyeron terraplenes siguiendo curvas de nivel con una inclinación contraria a la pendiente del terreno. Cada terraza fue contenida en su cota inferior utilizando sacos llenos de tierra, producto de la masa de suelo removida. Las terrazas se diseñaron con una superficie de  $12.5 \text{ m}^2$  cada una (10 metros de largo por 1.25 m de ancho) (Figura 7). Cabe mencionar que la distancia entre terrazas fue de 2 m, un metro menos al resultado obtenido en la fórmula de Intervalo Vertical (CONAFOR, 2004), ello debido a la escasa disponibilidad de terreno y por tratarse de una parcela demostrativa, sin soslayar el porcentaje de pendiente (35%), la precipitación y el factor de corrección.



**Figura 7.** a) trazo de curvas a nivel para la construcción de terrazas, b) construcción de terrazas.

Fórmula utilizada para calcular el espaciamiento entre terrazas de acuerdo con CONAFOR (2004):

$$IV = \frac{(2 + P)}{3 \text{ ó } 4} \times 0.305 \quad Ec_1$$

Donde:

IV = intervalo vertical (m)

P = pendiente del terreno (%)

3 = si la precipitación es menor de 1 200 mm de lluvia al año

4 = si la precipitación es mayor de 1 200 mm de lluvia al año

0.305 = factor de corrección de unidades.

En caso de utilizar el intervalo horizontal en lugar del vertical se emplea la ecuación 2:

$$IH = \left( \frac{IV}{P} \right) * 100 \quad \text{Ec}_2$$

Donde:

IH es el intervalo horizontal (m)

IV es el intervalo vertical (m)

P es la pendiente del terreno (%)

#### 5.4. METODOLOGÍA PARA ESTABLECER EL SISTEMA AGROFORESTAL Y DISEÑO EXPERIMENTAL

Se implementó un sistema silvopastoril dentro del cual se adoptó la práctica de árboles de uso múltiples en pastizales, al efecto se seleccionaron dos especies leguminosas Guaje (*Leucaena leucocephala*) y Recedá o moringa (*Moringa oleífera*). Las semillas de ambas especies se obtuvieron sin tomar en cuenta métodos de selección en los árboles; la recolección se hizo al azar colectando semillas ya secas de los árboles.

Posteriormente se pusieron a germinar tres semillas en cada bolsa de polietileno de  $\frac{1}{4}$  de kg utilizando tierra de monte como sustrato. Para el caso de la moringa a los ocho días se registró el 80 % de germinación. En el caso de *Leucaena* se obtuvo el 95% de germinación a los 10 días. Las plántulas se mantuvieron por 6 meses en vivero únicamente proporcionándoles agua, sin aplicación de fertilizante.

El sistema de plantación utilizado en la parcela demostrativa fue el de marco real, a una distancia de 1.25 m (Figura 8); el diseño experimental consistió de un modelo bloques al azar con tres tratamientos, dos repeticiones y un testigo, lo que arrojó un total de 6 terrazas experimentales y una más para el testigo, la distribución se muestra en la tabla 13:

Los análisis de regresión lineal y de varianza para determinar diferencias significativas con  $P < 0.05$  se efectuaron mediante el sistema de análisis estadístico SAS (Statistical Analysis Sistem, 1996).

**Tabla 13.** Tratamientos en el sistema agroforestal

ARREGLO ESPACIAL EN LA PARCELA DEMOSTRATIVA			
Trat-Rep.	Especie	Distancia (metros)	Sistema de plantación
T1	<i>Leucaena</i>	1.25	Marco real
T2	<i>Moringa</i>	1.25	Marco real
T3	<i>Leuca/Moringa</i>	1.25	Marco real
T1	<i>Leucaena</i>	1.25	Marco real
T2	<i>Moringa</i>	1.25	Marco real
T3	<i>Leuca/Moringa</i>	1.25	Marco real
Testigo	-----	-----	-----

Cada terraza (establecida en contorno a nivel del terreno), se conformó de 8 plantas a lo largo de la misma (Figura 8)



a)

b)

**Figura 8.** a) Plantación de las especies leguminosas, b) el sistema agroforestal 48 días después.

Para evaluar el crecimiento de las plantas, se consideraron los siguientes parámetros para ambas especies: Altura total, diámetro de copa y diámetro al cuello de la raíz (Diéguez *et al*, 2003).

Al efecto se utilizaron los siguientes instrumentos (vernier y flexómetro). Así mismo se estableció un programa de mediciones que comprendió el periodo julio-diciembre de 2007, efectuándose estas determinaciones una vez por mes para cada planta. Las plantas fueron debidamente identificadas de acuerdo al diseño experimental establecido. En total se llevaron a cabo seis mediciones, cuyos datos se consignaron en tablas de control a los cuales se practicó el análisis de varianza respectivo.

## CAPÍTULO VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DEL SUELO MATERIA DE ESTUDIO

Como resultado de las observaciones y análisis practicados tanto en campo como en laboratorio (Figura 9), se determinó que los suelos objeto de estudio, corresponden al tipo de los regosoles éutricos, que se caracterizan por tener espesores pocos desarrollados. En efecto, este tipo de suelos se han originado a partir de rocas metamórficas muy antiguas y de rocas ígneas extrusivas ácidas. El horizonte A acumula buena cantidad de residuos vegetales frescos que rápidamente son descompuestos por acción de la radiación solar, la temperatura y la actividad microbiana, lo que origina una delgada capa oscura, cuya fertilidad dependerá del contenido de materia orgánica; su horizonte B presenta acumulación de hidróxidos de fierro y aluminio, predominan minerales como la goethita y la hematita que confieren color rojo a los suelos, el horizonte C es un espesor de alto contenido de silicatos primarios no intemperizados que tiene diferentes gradaciones hasta llegar a la roca madre (Sánchez *et al*, 2006).



**Figura 9.** Análisis granulométrico por el método de Bouyoucos.

### 6.1.1. Textura

Los resultados derivados de la aplicación del método del hidrómetro de Bouyoucos y del triángulo de clases texturales indican que la textura del suelo es franco-arenosa (Figura 9); su fase lítica origina suelos poco desarrollados con buen drenaje, que establecen un frágil equilibrio con la vegetación forestal, de tal manera que al degradarse la cubierta vegetal, quedan expuestos a procesos erosivos hídricos y eólicos intensos, lo que coincide con lo señalado por FitzPatrick, (1971); Tisdale y Nelson, (1970), quienes consideran que estos suelos son de vocación natural forestal, por lo que cualquier cambio de uso del suelo les causa una severa perturbación.

**Tabla 14.** Determinación textural de diversos espesores del perfil de suelo materia de estudio.

<b>Profundidad (cm)</b>	<b>% de arena</b>	<b>% arcilla</b>	<b>% de limo</b>	<b>Textura</b>	<b>% de M.O</b>
0 - 20	84	6	10	Franco-arenosa	4
20 - 40	85	2	13	Franco-arenosa	2.5
40 - 60	84	6	10	Franco-arenosa	2.1
60 - 80	80	2	18	Franco-arenosa	1.4
80 - 100	81	2	17	Franco-arenosa	1

### 6.1.2. Estructura

Se determinó como del tipo granular mediante observación directa.

### 6.1.3. Color del perfil del suelo

La determinación del color del perfil del suelo, se llevó a cabo utilizando las cartas Munsell de color del suelo, con los siguientes resultados (Tabla 13).

**Tabla 15.** Determinación del color de espesores del perfil del suelo materia de estudio

a) En seco

<b>ESTRATO(cm)</b>	<b>HUE</b>	<b>VALUE</b>	<b>COLOR</b>
0 - 20	2.5 YR	6/1	Gris rojizo
20 - 40	2.5 YR	6/3	Café rojizo claro
40 - 60	2.5 YR	6/3	Café rojizo claro
60 - 80	2.5 YR	6/4	Café rojizo claro
80 - 100	2.5 YR	6/3	Café rojizo claro

b) En húmedo

<b>ESTRATO(cm)</b>	<b>HUE</b>	<b>VALUE</b>	<b>COLOR</b>
0 - 20	7.5 YR	4/2	Café
20 - 40	7.5 YR	4/3	Café
40 - 60	7.5 YR	4/3	Café
60 - 80	7.5 YR	4/4	Café
80 - 100	7.5 YR	4/3	Café

Como se puede apreciar son suelos que en sus distintos espesores presentan un color rojizo, cuyos procesos de oxidación inciden en la formación de material ferroso como la hematita ( $Fe_2O_3$ ) de presencia común en suelos tropicales con vocación forestal, con buen drenaje y aireación y por lo general buena estructura. Por su parte, el color gris del espesor 0 – 20 cm determinado en estado seco es resultado de la remoción del hierro por procesos de lixiviación con agua ácida y por agentes quelatantes, lo que ocurre en temporada de lluvias (León, 2006).

#### **6.1.4. Arcillas**

Según (Sánchez y Sandoval, 2005); la Caolinita ocupa más del 80 % de la fracción arcillosa, lo que guarda relación con una baja capacidad de intercambio catiónico que en

general disminuye al descender con la profundidad del perfil, como se aprecia en la tabla 14, lo que indica baja disposición de cationes básicos para las plantas a saber  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ .

#### **6.1.5. pH**

Los valores de pH determinados en los extractos de saturación de los distintos espesores del suelo (Tabla 15), oscilan de 5.6 en el espesor superior a 5.1 en espesor inferior, por lo que se trata de suelos ácidos (Tisdale y Nelson, 1970). El pH es responsable de que los hidróxidos de fierro y aluminio precipiten y se acumulen en el horizonte iluvial B como óxidos de fierro y aluminio, igualmente es responsable de que los cationes básicos calcio, magnesio, sodio y potasio sean lixiviados con el agua de drenaje y en consecuencia tengan poca presencia en estos suelos.

#### **6.1.6. Conductividad eléctrica**

Los extractos acuosos de suelo derivados de las pastas de saturación de los distintos espesores, registraron conductividades eléctricas que oscilan de  $0.405 \text{ dSm}^{-1}$  en el espesor superior a  $0.331 \text{ dSm}^{-1}$  en promedio en los cuatro últimos espesores, esto indica que se trata de un suelo sin problema de sales y por ende de baja concentración electrolítica en la solución del suelo, lo cual guarda relación con los procesos de lixiviación de cationes básicos ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ). Igualmente del análisis de la tabla 15 relativa a los parámetros físico-químicos determinados en cada espesor, se observa que en las capas superiores 0 – 20 cm y 20 – 40 cm se acumula la mayor concentración electrolítica, que descende en profundidad. En efecto, los minerales sales de los primeros 30 centímetros de suelo se constituyen en nutrimentos disponibles para el crecimiento y desarrollo de los organismos vegetales, de tal forma que la pérdida de dichos espesores por erosión hídrica y/o eólica traerá como consecuencia una disminución drástica de la capacidad nutrimental de dichos suelos.

### 6.1.7. Contenido de Materia Orgánica

El contenido de materia orgánica osciló entre 3 y 4 % en el horizonte húmico y disminuyó a 1 % hasta una profundidad de 1 m (Tabla 12). Tisdale y Nelson, (1970) señalan que el escaso contenido de materia orgánica derivado de acelerados procesos intempéricos, impone limitantes al establecimiento de especies forestales e incluso a la actividad agrícola.

### 6.1.8. Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico (Figura 10) de acuerdo a los resultados de laboratorio, oscila de  $16.8 \text{ Cmol kg}^{-1}$  a  $32.7 \text{ Cmol kg}^{-1}$  en promedio en los tres últimos espesores, por lo que se considera una capacidad de intercambio baja a intermedia (Tabla 16), según la NOM-021-RECNAT, (2000). De lo anterior se deduce que los procesos eluviales que ocurren en estos suelos por remoción de arcillas, provocan su acumulación en los horizontes inferiores, por tanto los espesores superiores presentan poca capacidad de acumulación nutritiva y de oferta de éstos a los vegetales.



a)



b)

**Figura 10.** Determinación de la capacidad de intercambio catiónico a) después del centrifugado b) titulación con EDTA.

**Tabla 16. Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)**

ESPESOR(cm)	M <sub>1</sub> (ml EDTA)	M <sub>2</sub> (ml EDTA)	M <sub>3</sub> (ml EDTA)	Media (ml EDTA)	CIC (Cmol kg <sup>-1</sup> )	CLASIFICACIÓN
0-20	35.7	37	35.9	36.2	16.8	Baja
20-40	35.2	35	36.1	35.4	21.8	Baja
40-60	34.9	35	34.8	34.9	25	Baja
60-80	34.5	33.2	33.6	33.8	32.5	Media
80-100	32.7	33	31.5	32.4	40.6	Media - Alta

### 6.1.9. Cationes y aniones solubles

Como se desprende de los datos de la tabla 17, relativa a la concentración de iones solubles en los extractos de saturación del perfil de suelo analizado, se determinó una baja concentración de bicarbonatos, cloruros, sulfatos, calcio, magnesio, sodio y potasio, lo que obedece a que éstos son lixiviados del perfil del suelo por las aguas de drenaje provenientes de la precipitación pluvial; este fenómeno es de común ocurrencia en suelos ácidos de valles intermontanos con pendientes superiores a 30%, cercanos a las costas en regiones tropicales subhúmedas (Buckman y Brady, 1977). Lo anterior implica que iones nutrimentales secundarios como el calcio y el magnesio son deficitarios en estos suelos dada su fácil remoción, por ello para el establecimiento de especies agroforestales, es condición necesaria evitar los procesos erosivos, a fin de que en el espesor de suelo en que se desarrollan éstos organismos vegetales se almacenen las concentraciones mínimas necesarias de estos iones para garantizar el crecimiento y desarrollo de dichas especies, ello se logra implementando técnicas de conservación de suelos como lo son las terrazas y la plantación de especies forestales que arraiguen las partículas del suelo evitando la excesiva migración iónica por escorrentía superficial o por precipitación hacia horizontes inferiores del suelo. Los análisis de laboratorio también revelan que se trata de suelos no salinos.



a)



b)

**Figura 11.** Determinación de Calcio y Magnesio por el método colorimétrico en laboratorio a) en el momento del vire b) el cambio de color.

**TABLA 17.** Concentración electrolítica y salinidad del suelo en el experimento “Establecimiento de un Sistema Agroforestal con dos especies leguminosas para la recuperación de suelos degradados en la micro-cuenca de San Pedro Mixtepec, Juquila, Oaxaca.”

Espesor del suelo (cm)	Relación de extracción suelo-agua	pH	CE(dS m <sup>-1</sup> )	ppm	meq 100 g <sup>-1</sup> de suelo										RSE (%p/p)	RSC (%p/p)
					CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-1</sup>	Cl <sup>-1</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Total	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+1</sup>	K <sup>+1</sup>	Total		
0 - 20	1 ≈ 0.2 - 0.6	5.65	0.405	202	0.000	0.063	0.045	0.130	0.238	0.009	0.005	0.72	0.48	1.21	0.372	0.120
20 - 40	1 ≈ 0.2 - 0.6	6.23	0.136	68	0.000	0.050	0.046	0.105	0.201	0.006	0.004	0.49	0.16	0.66	0.357	0.121
40 - 60	1 ≈ 0.2 - 0.6	5.60	0.138	69	0.000	0.055	0.020	0.021	0.096	.007	0.000	0.85	0.16	2.01	0.323	0.105
60 - 80	1 ≈ 0.2 - 0.6	6.58	0.88	44	0.000	0.073	0.033	0.030	0.136	0.008	0.000	0.19	0.15	0.35	0.295	0.820
80 - 100	1 ≈ 0.2 - 0.6	5.10	0.172	86	0.000	0.062	0.025	0.022	0.109	0.008	0.005	0.83	0.18	1.02	0.189	0.660

**Tabla 18.** Concentración electrolítica y salinidad del sedimento recolectado después de la época de lluvia.

					meq 100 g <sup>-1</sup> de suelo										RSE	RSC
Espesor del suelo	Relación de extracción suelo-agua	pH	CE (dS m <sup>-1</sup> )	ppm	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-1</sup>	Cl <sup>-1</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Total	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+1</sup>	K <sup>+1</sup>	Total	(%p/p)	(%p/p)
sedimento	1 ≈ 0.2 - 0.6	6.8	3,308	1,655	0.000	0.820	0.040	0.145	1.005	0.488	0.180	0.00	0.83	1.50	0.400	0.200

Por su parte, del análisis de los datos de la tabla 18, se llega a conocer que la acumulación de sedimentos producto de la erosión tienen una mayor concentración electrolítica que la registrada en época de estiaje (tabla 17), esto indica que la migración iónica ocurre con intensidad en época de lluvias acumulándose en las partes bajas, razón por la cual los parámetros pH y conductividad eléctrica presentan incrementos, ya que los cationes  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}$  y los aniones  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{Cl}$  y  $\text{SO}_4$  tienden a formar minerales sales.

Lo anterior es una manifestación evidente del empobrecimiento nutrimental de los suelos del área experimental por efecto de la hidro-erosión.

#### **6.1.10. Vegetación que sostienen estos suelos**

De manera general, la vegetación que crece y se desarrolla en los suelos materia de estudio, es Selva Baja Caducifolia con vegetación secundaria, se trata de un área rica y diversa en especies entre ellas el género *Leucaena*. (Santiago, 2005). En las áreas donde los suelos son pobres en mantillo orgánico, llamado comúnmente tepetates, se asocia con lomeríos que se presenta en forma de parches incrustados en la selva baja caducifolia. La vegetación se caracteriza físionómicamente por la baja estatura de los componentes arbóreos (normalmente de 4 a 12 m), los cuales se encuentran en un solo estrato, y por la pérdida de las hojas durante un período de seis meses aproximadamente. Los troncos de los árboles son generalmente cortos, torcidos y ramificados cerca de la base, o por lo menos en la mitad inferior y las copas muy extendidas y poco densas. El estrato herbáceo y arbustivo es abundante en la época de lluvias, que es cuando retoñan y germinan muchas especies de hierbas, pero es escaso en la temporada de seca. (INEGI, 2004). Con base en estas características se eligió a una especie nativa como lo es el guaje (*Leucaena leucocephala*) para observar su crecimiento en un sistema agroforestal en condiciones de terrazas y compararlo con el de una planta introducida (*Moringa oleifera*), lo cual resultó un acierto dados los resultados obtenidos del proceso experimental.

### **6.1.11. Uso actual del suelo**

El actual uso del suelo está destinado principalmente a la ganadería extensiva, sin embargo, se registran importantes áreas destinadas a la agricultura migratoria empleando la roza-tumba-quema ya sea para el cultivo de maíz o para extender sus terrenos con pastizales. Se deduce de esto que, tanto la vegetación y por ende el suelo de la microcuenca se encuentra en constante deterioro ya que cada año se registran pérdidas importantes de cubierta vegetal y de suelo a causa de dichas actividades antrópicas (Sánchez *et al*, 2005).

## **6.2. DETERMINACIÓN DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL**

La microcuenca de San Pedro Mixtepec presenta una precipitación pluvial promedio anual de 900 mm (CONAGUA, 2007); el relieve es accidentado, la pendiente del terreno materia de estudio es de 35%, la temperatura promedio anual es de 28 °C y la vegetación se clasifica como Selva Baja Caducifolia, (INEGI, 2004). Con estos elementos se procedió a calcular el coeficiente de escorrentía del área, para la cual se tomaron en consideración las tablas de valores señalados en el apartado de uso, tratamiento y condición hidrológica del suelo, del capítulo cuatro. La proporción de lluvia que se convierte en escorrentía depende de muchos factores: topografía, vegetación, velocidad de infiltración, capacidad de retención del suelo, tipo de drenaje, etc. De acuerdo con estas características y el tipo de uso del suelo para la zona de estudio y la microcuenca en general, se obtuvo el coeficiente de escurrimiento mediante el Manual de Conservación de Suelo y Agua (CP. S.A.R.H., 1975), que es del orden de 0.22; así mismo y considerando lo descrito en el apartado 5.2.3, para la determinación del escurrimiento medio superficial, se procedió como sigue:

En primer término, se trata de un área con vocación forestal actualmente dedicada a la actividad ganadera, la cobertura del pastizal es del 90%, el suelo es un regosol eutrítico de menos de 1 metro de profundidad, franco arenoso y con un contenido de materia orgánica de 4%.

De acuerdo a lo anterior se puede señalar que se trata de un pastizal en condiciones regulares, moderadamente pastoreados, con cobertura vegetal en la mitad del área total, y con una condición hidrológica deficiente. El tipo de suelo por ser franco arenoso corresponde al grupo B.

El cálculo del escurrimiento medio del área de estudio se determinó tomando como base la superficie del área de referencia que es de 8.0 Km<sup>2</sup>; la precipitación pluvial media anual de 900 mm y la media mensual de 156 mm (Comisión Nacional del Agua, 2007), así como también su coeficiente de escurrimiento, el cual de acuerdo a las características del terreno (textura, cubierta vegetal y topografía) es de 0.22. Con estos elementos y el uso de las curvas numéricas respectivas, se aplicaron las siguientes relaciones (CONAFOR, 2004):

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad \text{Ec}_3$$

Donde:

Q = escurrimiento medio en mm

P = precipitación en mm

S = potencial máximo de retención de humedad

La variable potencial máximo de retención de humedad se determinó mediante la siguiente fórmula recomendada por el Manual de Obras y Prácticas de Conservación de Suelo de la Comisión Nacional Forestal, (2004).

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{Ec}_4$$

Donde:

S = potencial máximo de retención de humedad

CN = Curva numérica o número de curva obtenida de tablas

Por lo tanto:

$$S = \frac{25400}{79} - 254 = 67.5 \quad \text{Ec}_4$$

$$S = 67.5$$

Y sustituyendo el resultado en la ecuación del escurrimiento medio se determinó lo siguiente:

$$Q = \frac{(156 - 0.2(67.5))^2}{156 + 0.8(67.5)} = \frac{20306.25}{210} = 96.70 \text{ mm} \quad \text{Ec}_3$$

El valor obtenido indica que con estas condiciones de vegetación y de suelo, de los 156 mm de lluvia escurrirá una lámina de 96.70 mm.

Por otra parte se calculó el escurrimiento máximo instantáneo con base en el método sugerido por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de América mediante la siguiente ecuación (CONAFOR, 2004):

$$Qp = \frac{0.8PA}{360} \quad \text{Ec}_5$$

Donde:

$Q_p$  = escurrimiento máximo instantáneo ( $m^3 s^{-1}$ )

$\alpha$  = coeficiente de escurrimiento (Q/P)

$p$  = intensidad de la lluvia (mm/hr)

$A$  = área de drenaje (ha)

360 = factor de ajuste de unidades

Para fines prácticos, la duración del exceso de lluvia se puede asumir como el tiempo de duración de la tormenta y el tiempo de concentración, es decir el lapso que tarda en llegar una gota de agua de la parte más alta de la microcuenca a su parte más baja. Este tiempo se calculó con la siguiente ecuación:

$$T_c = 0.02 \frac{L^{1.15}}{H^{0.38}} \quad Ec_6$$

Donde:

$T_c$  = tiempo de concentración en minutos

$L$  = longitud de la corriente principal en metros

$H$  = diferencia altitudinal entre el sitio más elevado (parteaguas) y la boquillas de la cuenca

$$T_c = 0.02 \frac{10,000 \times 1.15}{200 \times 0.38} = \frac{11,500}{76} = 151.32 = 0.02(151.32) = 3.03$$

Datos:

$L = 10\,000$  metros

$H = 200$  metros

Para aplicar la ecuación de escurrimiento máximo instantáneo  $Q_p$ , también se requirió conocer la intensidad de la lluvia ( $P$ ) en  $\text{mm hr}^{-1}$ ; para ello la precipitación se dividió entre el tiempo de concentración determinado en la ecuación anterior.

$$P = \frac{156}{3.03} = 51.49 \text{ mm h}^{-1} \quad \text{Ec}_7$$

Además, el coeficiente de escurrimiento determinado es de 0.22 de acuerdo a la tabla de valores para el coeficiente de escurrimiento del Manual de Conservación de Suelo y Agua CP. S.A.R.H. (1975). Con todo esto se tiene que:

$$Q_p = \frac{\alpha PA}{360} \quad \text{Ec}_5$$

Datos:

$$\alpha = 0.22$$

$$P = 51.49 \text{ mm hr}^{-1}$$

$$Q_p = \frac{(0.22)(51.49)(800)}{360} = \frac{9062.24}{360} = 25.17 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

Finalmente para obtener el volumen total escurrido en  $\text{m}^3$  se tomó en cuenta el escurrimiento medio (96.70 mm), el área de drenaje de la microcuenca (800 hectáreas), para lo cual se utilizó la siguiente ecuación.

Ec<sub>8</sub>

$$Q = \frac{(96.70)(800 \text{ ha})(10,000 \text{ m}^2)}{1000} = 773,600 \text{ m}^3 = 773.60 \text{ Mm}^3$$

Dado el volumen calculado de escorrentía se infiere que se trata de una microcuenca con procesos erosivos hídricos, intensificados por actividades antropogénicas que se han venido desarrollando en la misma.

### **6.2.1. Determinación de la erosión hídrica**

En estas condiciones se procedió a calcular el índice de erosión de los suelos objeto de estudio, mediante la aplicación de la ecuación universal de la erosión, que integra los siguientes parámetros:

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

Donde:

A = pérdida promedio de suelos (ton/ha).

R = Erosividad de la lluvia (ton/ha).

K = Erodabilidad del suelo (ton/ha).

L = Largo de la pendiente (m).

S = Magnitud de la pendiente (%).

C = Cubierta vegetal y manejo de cultivos.

P = Prácticas de conservación.

De acuerdo a lo establecido en el apartado 5.2.2, relativo a la ecuación universal de pérdida de suelo se procedió a sustituir en los valores determinados para cada una de las variables; arrojando los siguientes resultados.

1) Erosividad R.

Se calculó sustituyendo los valores en la expresión de Lombardi Neto y Moldenhauer (1980). Citado por Mattos (1999); y arrojó el siguiente resultado:

$$R = 6.866 \frac{(p^2)}{P}^{0.85}$$

Datos:

Precipitación media mensual = 156 mm.

Donde:

R = Índice medio de erosividad anual (Ton ha<sup>-1</sup>).

p = Precipitación media mensual (mm).

P = Precipitación media anual (mm).

De lo cual se obtiene lo siguiente:

$$R = 6.866 [(156)^2/900]^{0.85}$$

$$R = 6.866 (24,336/900)^{0.85}$$

$$R = 6.866(27.04)^{0.85}$$

$$R = 6.866(16.49)$$

$$R = 113.22 \text{ Ton ha}^{-1}$$

2) Erodabilidad del Suelo K.

De acuerdo a las características físicas del suelo y con base en la tabla 4, correspondiente al rango de valores para K; se determinó el valor de 0.25 para esta variable. Por lo que se refiere a las demás variables los valores son los siguientes:

3) Largo de la pendiente

$$L = 12 \text{ metros}$$

4) Magnitud de la pendiente

$$S = 35 \%$$

5) Cubierta vegetal y manejo de cultivos

$$C = 0.8$$

6) Prácticas de conservación

$$P = 0.10$$

Por lo que sustituyendo estos valores en la ecuación universal de pérdida de suelo se obtuvo el siguiente resultado:

$$A = (113.22) (0.25) (12) (0.35) (0.8) (0.10)$$

$$A = \mathbf{9.51} \text{ Ton ha}^{-1}.$$

En consecuencia, la pérdida promedio de suelo al año por efecto de la lluvia es de 9.51 Ton ha<sup>-1</sup>, lo que refleja la intensidad con la que los suelos en la microcuenca de San Pedro Mixtepec están siendo degradados y que de continuar este proceso degradatorio edáfico en el corto plazo se estará perdiendo una gran cantidad de suelo con potencial agro-productivo y forestal. Estos valores de erosión indican que además de los procesos naturales intempéricos, los suelos de la microcuenca son degradados por actividades antrópicas como la agricultura y la ganadería, la explotación continua de los suelos genera un círculo degradatorio del sistema edáfico que los empobrece y los hace improductivos, pero también genera una perturbación del equilibrio ecológico de la microcuenca.

### **6.2.2. De las terrazas**

La roza-tumba-quema es una técnica común en los agro-ecosistemas de la microcuenca, arraigada por años en el sistema de cultivo de las familias campesinas de la zona y que año con año y hasta cierto punto permite su subsistencia alimentaria, sin embargo su aplicación en suelos de relieve accidentado, constituye una práctica que provoca cambios devastadores en el entorno regional y cuyas consecuencias biológicas y ecológicas se traducen según Hudson, (1982) en: 1) La desaparición de especies vegetales nativas; 2) La pérdida de suelo potencialmente productivo por erosión y 3) La desertificación como consecuencia de las anteriores y su arraigo dadas las nuevas condiciones climáticas, y el desequilibrio hidrológico.

El terracéo como práctica de conservación de suelo ha demostrado que es una alternativa ecológica para conservar no únicamente el suelo sino que además, la vegetación, el recurso hídrico y el medio ambiente en general. Luego entonces, su implementación en el presente experimento permitió llegar a conocer sus ventajas, dentro de las cuales se pueden citar las siguientes: 1) generación de condiciones idóneas de sustrato y humedad para el desarrollo de las plantas, 2) la reducción del escurrimiento superficial, el aumento de la infiltración y de la captura de sedimentos, principio fundamental para la retención de suelo

y 3) la disminución de lavado de nutrientes necesarios para mantener la fertilidad del suelo y la productividad del sistema agroforestal. En concreto, el establecimiento de terracéo permitió la captación de agua y sedimento, lo que influyó de manera determinante en el establecimiento y desarrollo de las especies vegetales utilizadas.

Con respecto a la migración iónica se remite al lector a las tablas 17 y 18 referentes a la determinación de cationes y aniones, donde puede observarse la concentración de sales obtenida del análisis químico del suelo antes y después del periodo de lluvias en dicho experimento. Es decir, el beneficio ambiental de las terrazas es extremadamente amplio ya que desde el momento que se establecieron en la parcela experimental objeto de estudio, se generaron condiciones idóneas de sustrato y humedad para el desarrollo de las plantas, ofreciéndoles con esto un medio más favorable para su establecimiento y crecimiento. Por otra parte, son las terrazas las que en principio realizaron la labor de retención de suelo y evitaron con esto el lavado de nutrientes necesarios para favorecer el establecimiento y desarrollo del sistema agroforestal. Lo anterior coincide con los resultados obtenidos en investigaciones realizadas por diversos autores, donde se concluye que las terrazas en laderas son una buena opción técnica para reducir el escurrimiento superficial, favorecer la infiltración y la retención de sedimentos lo que conlleva directamente a un mejor desarrollo del cultivo (Anaya, 1998).

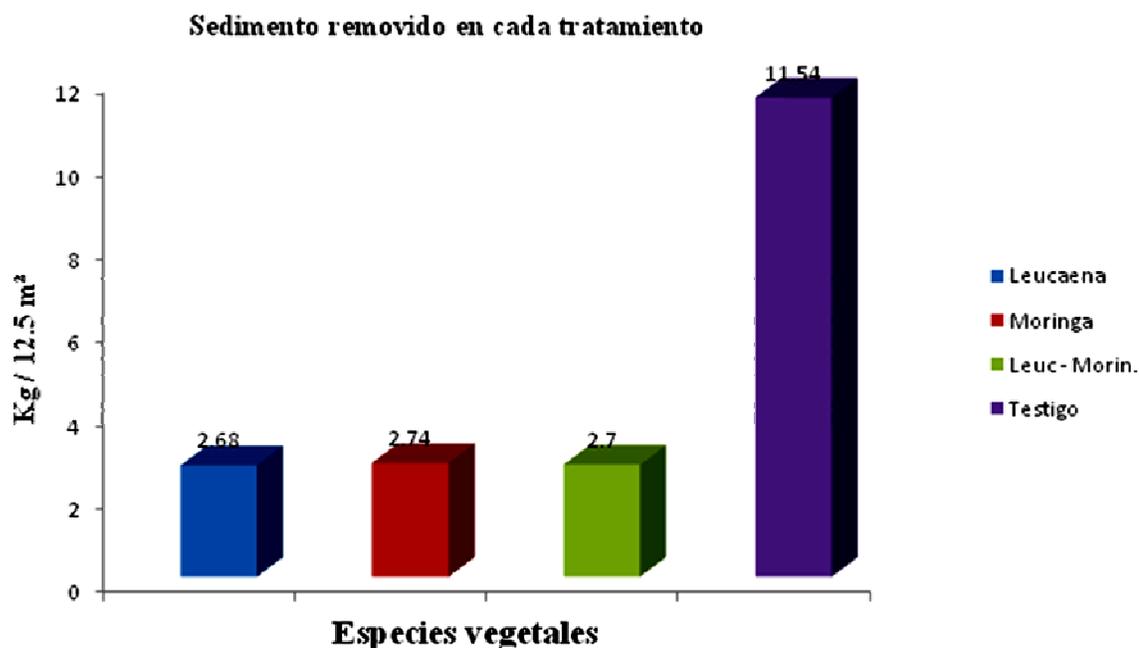
Además, el terracéo en laderas permite la rehabilitación de tierra estéril y degradada ya que dentro de los aspectos agronómicos más importantes las terrazas permiten la incorporación de estiércol para mejorar las condiciones de fertilidad del suelo e inducir un mejor establecimiento de las plantas (Yanggen *et al*, 2003).

Por otra parte, las terrazas por medio de la retención de agua ayudan a la infiltración proporcionando suficiente humedad por más tiempo a las plantas, esto ha dado buenos resultados en diversas plantaciones modernas de té en Malawi en el Sureste de África (Hudson, 1982).

Para mejor proveer, y a efecto de disertar sobre la dimensión de la erosión en la microcuena y compararla con la magnitud de la erosión en las terrazas, se consideró en principio la masa de sedimento removido en época de lluvia en el lote de escurrimiento superficial de la parcela experimental que fue del orden de 11.54 kg en una superficie de 12.5 m<sup>2</sup>, que proyectado a hectáreas arrojó una cantidad de 9.2 Ton ha<sup>-1</sup>, lo que coincide con el dato obtenido en la ecuación universal de pérdida de suelo y confirma que se trata de suelos expuestos a degradación en el tiempo. Estos resultados fueron comparados con el valor de la erosión determinada en cada una las terrazas, dichos valores se exponen en la tabla 19.

**Tabla 19.** Cantidad de suelo removido por la lluvia en cada tratamiento.

TRATAMIENTO	SUPERFICIE	REMOSIÓN DE SUELO (kg)	PROMEDIO (kg)
T <sub>1</sub> = Leucaena	12.5 m <sup>2</sup>	2.72	2.68
T <sub>1</sub> = Leucaena	12.5 m <sup>2</sup>	2.63	
T <sub>2</sub> = Moringa	12.5 m <sup>2</sup>	2.79	2.74
T <sub>2</sub> = Moringa	12.5 m <sup>2</sup>	2.68	
T <sub>3</sub> = Leucaena - Moringa	12.5 m <sup>2</sup>	2.79	2.70
T <sub>3</sub> = Leucaena - Moringa	12.5 m <sup>2</sup>	2.61	
Testigo	12.5 m <sup>2</sup>	11.54	11.54



**Figura 12.** Erosión hídrica en los diferentes tratamientos

Los resultados anteriores se obtuvieron por cada tratamiento dando un promedio de 2.71 Kg de suelo erosionado en 12.5 m<sup>2</sup>; lo que proyectado a toneladas por hectárea arroja la cantidad de 2.17 Toneladas. Comparando este resultado con el obtenido en el lote de escurrimiento, el cual fue evaluado sin terrazas y sin plantas que arrojó un valor de 9.2 Ton ha<sup>-1</sup>, luego entonces, quiere decir que por medio del sistema de terracéo en combinación con agroforestería aquí descrito, el arrastre de partículas de suelo por efecto de la lluvia disminuye en 7.03 Ton ha<sup>-1</sup> que representa el 76%. Lo anterior pone de manifiesto una vez más que el terracéo es sumamente eficiente para controlar la erosión hídrica.

En lo que respecta a la inversión realizada para la elaboración de las terrazas, cabe mencionar que es una actividad en la cual se requieren los mínimos insumos externos necesarios, ya que se necesitan herramientas menores de trabajo, a saber; cinta métrica, pala, barreta, pico y desde luego mano de obra para realizar la actividad. Cabe mencionar que las terrazas construidas en el presente experimento están diseñadas para que en ellas se

invierta el mínimo insumo, tanto en mano de obra como en implementos, de tal manera que se utilizaron costales llenos de tierra del mismo lugar para formar el muro de contención de cada terraza y se reforzaron con estacas en la parte baja, acomodándose en hilera a través de la misma (Figura 13); así se obtuvo el mismo resultado que si se hubiera utilizado piedra acomodada o muros de contención hechos con cemento.

Se considera que esta técnica de terracéo es mucho más barata y sencilla debido a que se utilizan materiales de la región disponibles en el lugar, lo que reduce en gran medida los costos y además se obtienen resultados similares a los demás métodos.



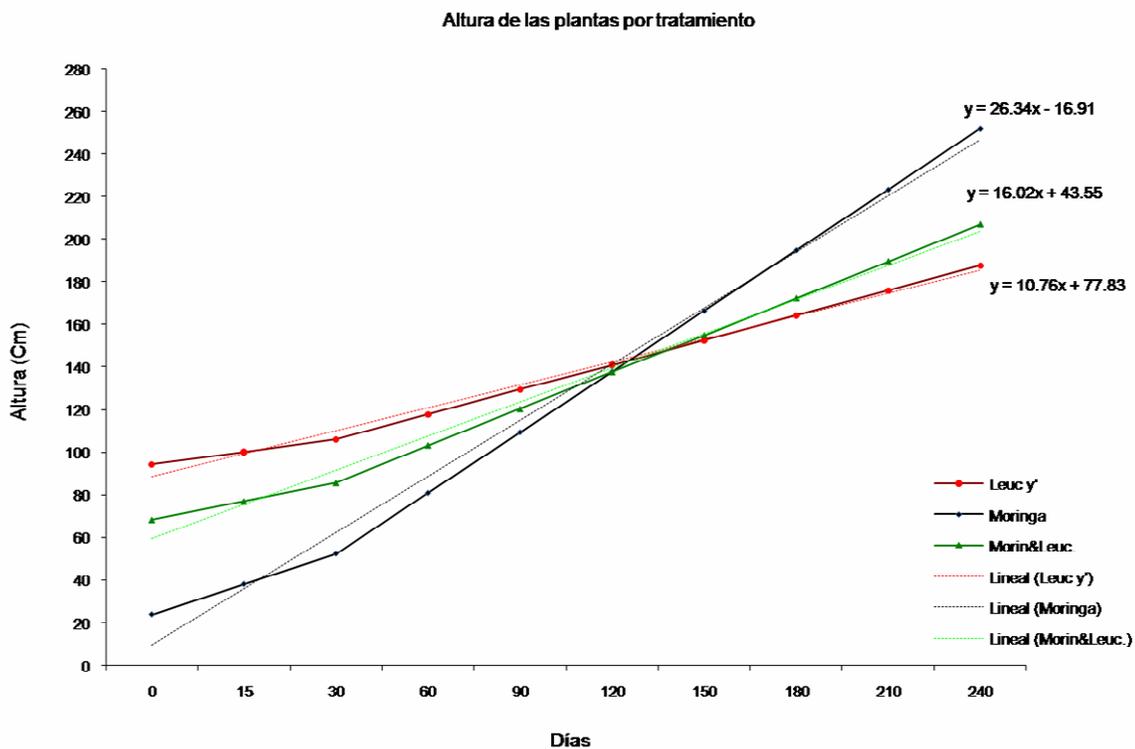
**Figura 13.** Terrazas construidas a base de costales llenos de tierra y estacas.

Según (Hudson, 1982) el control de la erosión es difícil y caro puesto que una vez que se ha roto el equilibrio en el sistema agua-suelo-planta, se requiere un mayor esfuerzo para restaurar la situación inicial; por lo que “prevenir es mejor que remediar”. La restauración exige una gran inversión de tiempo, esfuerzo y dinero el cual podría ser más útil empleándolo en la prevención del deterioro del recurso suelo.

En cuanto a los insumos requeridos para el establecimiento del sistema agroforestal en terrazas objeto de estudio, la inversión fue de 100 pesos por terraza, realizando una inversión total de 600 pesos. En el presente trabajo, esto quiere decir, que si bien la construcción de terrazas en suelos degradados no es muy factible en términos económicos, sí lo es ambientalmente por los beneficios proporcionados. Además el productor debe estar consciente que recuperar y conservar el recurso suelo se traduce en ingresos que mejoran su economía familiar dado que la diversidad de cultivos a establecer aumenta generando así mayores percepciones. Las terrazas en ladera fueron una buena opción técnica para reducir el escurrimiento superficial, favorecer la infiltración, capturar sedimentos y captar agua haciendo un uso eficiente de la misma, por lo cual se considera un estándar mejorado de la agroforestería.

### **6.3. EVALUACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL**

De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis de varianza con respecto al crecimiento en altura, diámetro de copa y diámetro al cuello de la raíz de las especies leguminosas *Leucaena leucocephalla* y *Moringa oleífera*; se llegó a conocer que ambas especies presentan propiedades particulares. Por ejemplo, *Leucaena* resultó tener más capacidad de adaptación inicial al suelo que la moringa, mismo que fue reflejado en su crecimiento en altura en los primeros cuatro meses (véase figura 14). Otra ventaja que manifestó la *Leucaena* es que, indudablemente es un árbol resistente a la sequía ya que requiere de menos suministro de agua durante su etapa de crecimiento para realizar su actividad fotosintética y promover crecimiento (Zárate, 1987).



**Figura 14.** Comportamiento de cada tratamiento con respecto a la variable altura de plantas.

Con respecto a las variables medidas en las plantas, a saber: diámetro, altura y diámetro de copa, cabe señalar que estas son de suma importancia para estimar el volumen de biomasa producida en función del tiempo. Por otra parte, saber las dimensiones de árboles se trata de una información básica en la administración del recurso. Así por ejemplo, la altura, y diámetro de los árboles puede reflejar la capacidad productiva de un terreno, el incremento medio anual, el volumen de madera aprovechable, entre otras (Romahn *et al*, 1994).

Sin embargo, algunos estudios afirman que el crecimiento poco sostenido de la *Leucaena* después de establecida, es producto de una ineficiente absorción de nutrientes por algunas leguminosas, lo que repercute en un crecimiento lento (Cooksley, 1974; citado por Zárate, 1987). Por lo que es necesario que en un futuro se realizaran estudios continuos y la toma de datos de crecimiento con el objetivo de confirmar lo anteriormente dicho.

Otra posible causa del lento crecimiento de *Leucaena* después de establecida, debe atribuirse al letargo o dormancia de la planta por efectos de estrés hídrico como lo señala (Scoot, 1977), así también puede influir el ataque de hormigas defoliadoras (*Atta spp.*) que periódicamente se presentó en el lote experimental.

Por su parte, la *Moringa* tuvo un crecimiento inicial lento, lo que implicó dificultades de adaptación al medio, ya que es una especie que se desarrolla adecuadamente en climas semiáridos (Parrotta, 1993); sin embargo, una vez establecida registró mayor crecimiento que *Leucaena* tanto en altura como en diámetro; al respecto el análisis de varianza indica que *Moringa* fue superior que *Leucaena* con un nivel de significancia del 0.05 %. Por otra parte, a pesar de que ambas especies son consideradas como de rápido crecimiento, durante los seis meses del experimento (Tabla 20), las plantas de *Leucaena* alcanzaron en promedio 1.35 metros en altura, 54.8 cm en diámetro de copa y 11.23 mm en diámetro al cuello; en contraste las plantas de *Moringa* presentaron en promedio 1.47 metros de altura, 58.6 cm de diámetro de copa y 18.3 mm de diámetro al cuello de la raíz. (Figura 15).

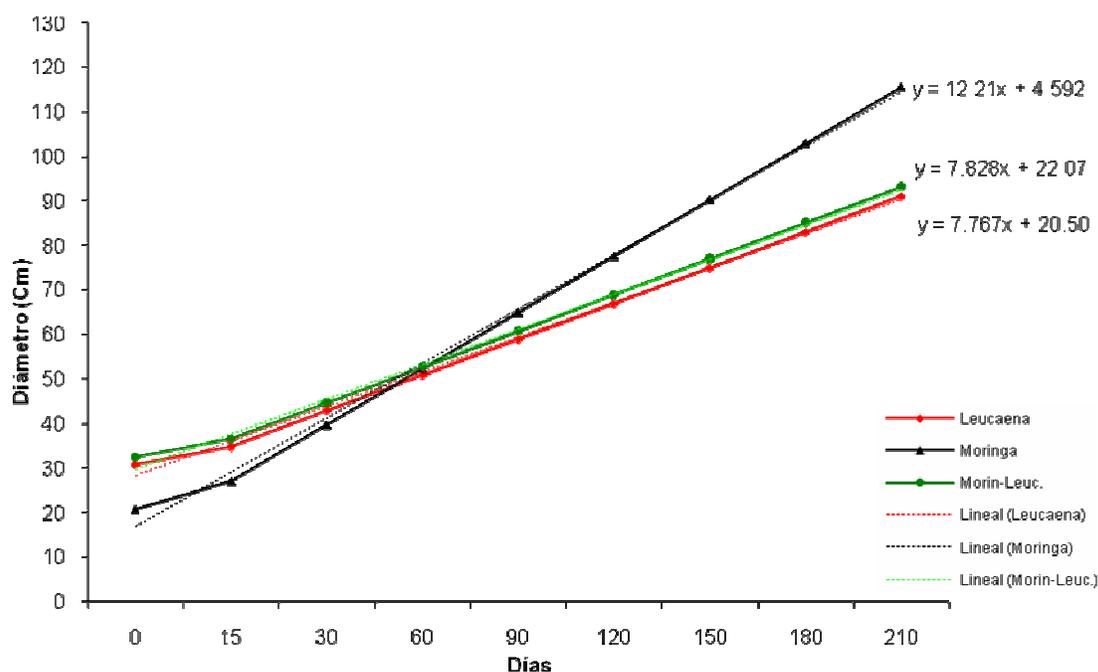


Figura 15. Comportamiento de cada tratamiento con respecto a la variable diámetro de copa.

Ambas especies arbóreas son fenotípica y fisiológicamente diferente en su adaptación al medio, lo cierto es que la mayor cobertura vegetal que presentan las plantas de *Moringa*, ofrece una mayor protección al suelo de la intemperie, pero a la vez dicho crecimiento superficial está ligado con el crecimiento de la raíz, lo que implica mayores espacios de retención de partículas de suelo por el sistema radicular de dicha planta, tal y como lo señala (Folk-ard y Sutherland, 1994).

Al respecto (Parrotta, 1993), señala la importancia de las raíces de estas plantas bien establecidas en el control de la erosión de suelos en pendiente; ya que los árboles de *Moringa* obtenidos de semillas, desarrollan una raíz pivotante gruesa y profunda, con un sistema extenso de raíces laterales tuberosas y gruesas; lo que trae como consecuencia una mejor retención del suelo y por lo tanto se evita el lavado excesivo de nutrientes.

En concordancia con lo anterior, el análisis estadístico respectivo, indica que *Moringa*, fue superior con un nivel de significancia del 5% en crecimiento respecto de *Leucaena*. Con esto se puede señalar que el desarrollo de *Moringa* se debió principalmente a la adaptación que tuvo al medio, sin embargo es necesario el seguimiento en la toma de datos para observar el desarrollo de la especie a mediano y largo plazo.

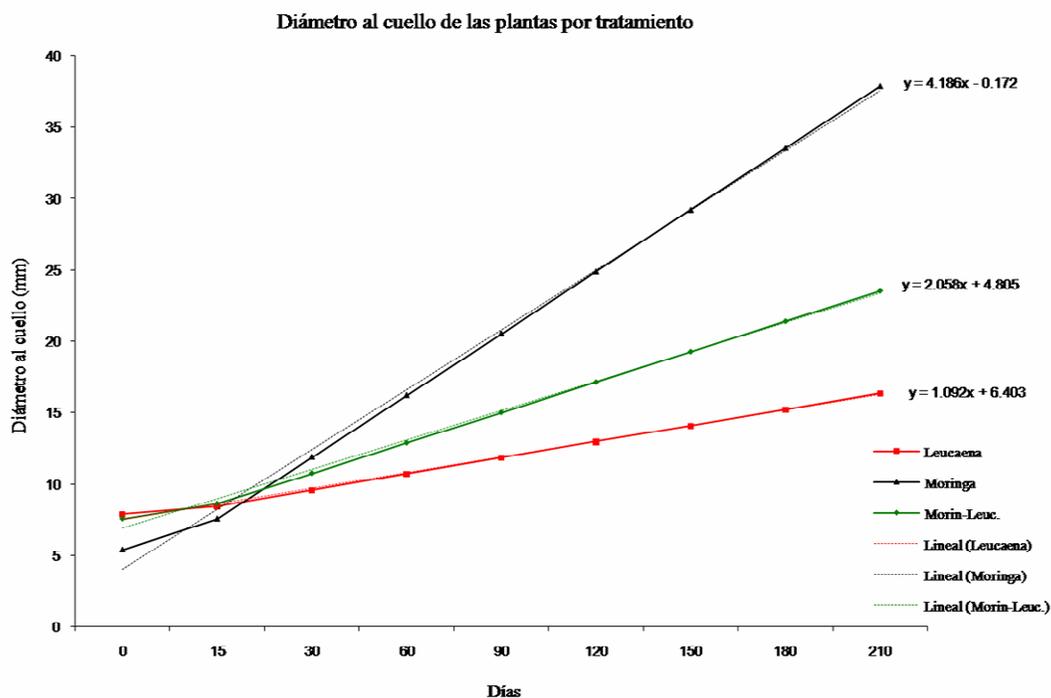
Con relación la combinación *Moringa* x *Leucaena*, los resultados promedios arrojados por el análisis de varianza fueron: 1.27 metros de altura, 56.7 cm de diámetro de copa y 13.9 mm de diámetro a la altura del cuello. Es decir, *Moringa* x *Leucaena* fue significativamente superior que *Leucaena* pero menor que *Moringa*, con un nivel de significancia del 5 %.

Lo anterior se aprecia en las figuras 14, 15 y 16 que plasman el crecimiento obtenido por las dos especies leguminosas así como su combinación; en las tres variables

evaluadas (altura, diámetro de copa y diámetro al cuello) *Moringa* se mostró superior al final, seguida de la combinación (*Moringa & Leucaena*) que sostuvo un crecimiento inferior a *Moringa* pero superior a *Leucaena* en todas las variables evaluadas.

Lo anterior nos lleva a deducir que a pesar de que *Leucaena* presentó un rápido crecimiento poco sostenido en un periodo de 6 meses, la *Moringa* evidenció ser más activa en cuanto a crecimiento en las tres variables consideradas, (altura, diámetro al cuello y diámetro de copa) dada su mayor capacidad de adaptación al sistema de terraceo.

Se consideran especies de rápido crecimiento aquellas que en un periodo de un año alcanzan por lo menos un metro de altura, siendo variable el crecimiento en diámetro y copa de acuerdo a la especie.



**Figura 16.** Comportamiento de cada tratamiento con respecto a la variable diámetro al cuello.

El mayor crecimiento y desarrollo de la *Moringa* tiene explicación en la capacidad que presenta la especie para desarrollarse tres veces más rápido que *Leucaena* y a la infinidad de bondades que presenta para crecer en condiciones adversas de humedad y nutrientes en suelos pobres (Folk-ard y Sutherland, 1994), lo que le da características deseables para utilizarlo en un sistema agroforestal en terrazas, por cuanto:

- a) Genera un rápido sistema radicular profundo y extenso que favorece la retención del suelo y la contención de la terraza en el corto plazo.
- b) Genera en corto tiempo una cubierta vegetal que regula la temperatura del suelo y favorece las condiciones de humedad del mismo, propiciando un microclima adecuado para el desarrollo de otras especies vegetales y animales.
- c) Sus residuos vegetales inician paulatinamente la generación de materia orgánica en las terrazas y con ello la actividad microbiana en la zona de la rizósfera (Hudson, 1982).
- d) Estudios realizados han demostrado que extractos de las hojas de *Moringa* ayudan a incrementar la nodulación de las raíces, el peso de los nódulos y la actividad de la nitrogenasa del *Rhizobium* cuando se aplica a las semillas o las raíces (Parrotta, 1993).

**Tabla 20.** Datos observados de cada variable para las plantas según su tratamiento.

<b>T<sub>1</sub></b>																				
<b>MES</b>	<b>ALTURA</b>	<b>DIAM.COPA</b>	<b>D. CUELLO</b>	<b>PARÁMETROS ESTADÍSTICOS</b>																
Julio	112.3	34.75	8.24	<table> <tr> <td></td> <td><b>ALTURA</b></td> <td><b>DIAM.COPA</b></td> <td><b>D. CUELLO</b></td> </tr> <tr> <td><math>\bar{X}</math></td> <td>135.3</td> <td>54.87</td> <td>11.23</td> </tr> <tr> <td><math>\sigma</math></td> <td>22.24</td> <td>15.24</td> <td>2.15</td> </tr> <tr> <td><b>C.V.</b></td> <td>0.16%</td> <td>0.28%</td> <td>0.19%</td> </tr> </table>		<b>ALTURA</b>	<b>DIAM.COPA</b>	<b>D. CUELLO</b>	$\bar{X}$	135.3	54.87	11.23	$\sigma$	22.24	15.24	2.15	<b>C.V.</b>	0.16%	0.28%	0.19%
	<b>ALTURA</b>	<b>DIAM.COPA</b>	<b>D. CUELLO</b>																	
$\bar{X}$	135.3	54.87	11.23																	
$\sigma$	22.24	15.24	2.15																	
<b>C.V.</b>	0.16%	0.28%	0.19%																	
Agosto	112.44	42.56	9.88																	
Septiembre	124.63	48.19	10.11																	
Octubre	143.25	62.31	12.38																	
Noviembre	154	69.31	12.94																	
Diciembre	165.19	72.13	13.86																	
<b>T<sub>2</sub></b>																				
Julio	101.5	27.81	8.91	<table> <tr> <td></td> <td><b>ALTURA</b></td> <td><b>DIAM.COPA</b></td> <td><b>D. CUELLO</b></td> </tr> <tr> <td><math>\bar{X}</math></td> <td>140.7</td> <td>58.65</td> <td>18.35</td> </tr> <tr> <td><math>\sigma</math></td> <td>39.36</td> <td>24.73</td> <td>8.28</td> </tr> <tr> <td><b>C.V.</b></td> <td>0.44%</td> <td>0.42%</td> <td>0.45%</td> </tr> </table>		<b>ALTURA</b>	<b>DIAM.COPA</b>	<b>D. CUELLO</b>	$\bar{X}$	140.7	58.65	18.35	$\sigma$	39.36	24.73	8.28	<b>C.V.</b>	0.44%	0.42%	0.45%
	<b>ALTURA</b>	<b>DIAM.COPA</b>	<b>D. CUELLO</b>																	
$\bar{X}$	140.7	58.65	18.35																	
$\sigma$	39.36	24.73	8.28																	
<b>C.V.</b>	0.44%	0.42%	0.45%																	
Agosto	102.34	37.25	11.54																	
Septiembre	120.23	45.19	13.33																	
Octubre	149.63	78.06	21.05																	
Noviembre	174.69	78.94	26.73																	
Diciembre	196.25	84.69	28.57																	
<b>T<sub>3</sub></b>																				
Julio	93.19	37.5	9.13	<table> <tr> <td></td> <td><b>ALTURA</b></td> <td><b>DIAM.COPA</b></td> <td><b>D. CUELLO</b></td> </tr> <tr> <td><math>\bar{X}</math></td> <td>127.06</td> <td>56.72</td> <td>13.92</td> </tr> <tr> <td><math>\sigma</math></td> <td>33.27</td> <td>15.54</td> <td>4.09</td> </tr> <tr> <td><b>C.V.</b></td> <td>0.26%</td> <td>0.27%</td> <td>0.29%</td> </tr> </table>		<b>ALTURA</b>	<b>DIAM.COPA</b>	<b>D. CUELLO</b>	$\bar{X}$	127.06	56.72	13.92	$\sigma$	33.27	15.54	4.09	<b>C.V.</b>	0.26%	0.27%	0.29%
	<b>ALTURA</b>	<b>DIAM.COPA</b>	<b>D. CUELLO</b>																	
$\bar{X}$	127.06	56.72	13.92																	
$\sigma$	33.27	15.54	4.09																	
<b>C.V.</b>	0.26%	0.27%	0.29%																	
Agosto	95.31	43.13	10.48																	
Septiembre	100.56	48.69	11.39																	
Octubre	140.81	66.44	15.89																	
Noviembre	160.94	70.13	17.97																	
Diciembre	171.56	74.44	18.64																	

## CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1. CONCLUSIONES

- 1) Los suelos de ladera con vocación forestal de la microcuenca San Pedro Mixtepec, Oaxaca, presentan graves problemas de perturbación y deterioro, dado el inadecuado uso del suelo basado en la destrucción de la selva baja caducifolia para abrir espacios al cultivo y la ganadería mediante el proceso de Roza-Tumba-Quema y la práctica del pastoreo extensivo, lo que actualmente se considera una filosofía contraria al principio de conservación medioambiental.
- 2) El principal fenómeno de denudación y desgaste de estos suelos es la erosión hídrica inducida por la pérdida de cobertura vegetal, de tal manera que al romperse el frágil equilibrio entre el sistema agua-suelo-planta, se incrementa la superficie erodable y la erosión en masa; colateralmente ocurren cambios adversos en el nivel nutritivo del suelo por desplazamiento iónico hacia las partes bajas, donde son lixiviados por las corrientes superficiales y subterráneas, así como cambios en las tasas de infiltración, de intercambio gaseoso y de capacidad de retención de humedad del suelo que modifican el paisaje hasta desertificarlo.
- 3) Considerando los factores climáticos, fisiográficos, edáfico y de vegetación del lugar, aplicados en la ecuación universal de pérdida de suelo, los resultados experimentales arrojan una erosión anual del orden de  $9.51 \text{ Ton ha}^{-1}$ , lo que da una idea de la intensidad del fenómeno degradatorio edáfico del sitio, e impone la necesidad de establecer técnicas de control y mejoramiento tales como el terraceo y el establecimiento de sistemas agroforestales.

- 4) Los datos del experimento también revelan que en un sistema agroforestal con terrazas, las plantas de la especie *Moringa oleífera*, crecen y se desarrollan más rápido que las de *Leucaena leucocephala*, ello permite contar en principio con un sistema de raíces bien desarrolladas para retener el suelo y conservar humedad e incentivar los procesos físico-químicos y biológicos de la rizosfera para generar paulatinamente suelo; en segundo término la formación de un área foliar permite regular la temperatura en las terrazas y aporta materia orgánica fresca al suelo provenientes de los residuos de hojas y vainas caducas.
- 5) El establecimiento de terrazas aunado a la implementación de un sistema agroforestal, demuestra ser una opción para la recuperación gradual de los suelos en la microcuenca de San Pedro Mixtepec, debido al bajo costo y a los resultados obtenidos en el presente trabajo, las terrazas muestran una capacidad sorprendente de retención de suelo de hasta un 76 % en cuanto a erosión hídrica ya que redujeron el escurrimiento superficial, favorecieron la infiltración y la captura de sedimentos al grado que se evitó la pérdida de 7.03 Ton ha<sup>-1</sup> en época de lluvia, esto conlleva directamente a un mejor desarrollo de las especies cultivadas.

## 6.2. RECOMENDACIONES

- 1) Tomando en cuenta los resultados arrojados en este experimento y conociendo la gran diversidad de beneficios aportados por *Moringa oleífera*, se recomienda utilizar esta especie en sistemas agroforestales de preferencia silvopastoriles, ya que son de rápida adaptabilidad y crecimiento; de tal manera que en el corto plazo pueden aportar gran cantidad de forraje para el ganado que además de nutritivo para los animales, también puede ser consumido por las personas.
- 2) Aunque el crecimiento de *Leucaena* no registró los resultados esperados, se recomienda tomarla en cuenta para sitios con características similares aún siendo estas más áridas ya que requiere de menor cantidad de agua y se adapta fácilmente al sitio lo que es una ventaja para la conservación del suelo en laderas.
- 3) El sistema combinado *Moringa* con *Leucaena* es una opción viable para practicar agroforestería en terrazas, sobre todo considerando el potencial de fijación de nitrógeno al suelo por ambas especies leguminosas, lo que deberá probarse en investigaciones que se realicen al efecto.
- 4) Continuar con investigaciones tendientes a evaluar el crecimiento, desarrollo y rendimiento de *Moringa oleífera* y *Leucaena leucocephala*, para determinar su viabilidad como cultivos alternativos en la modalidad agroforestal en condiciones de terracéo.
- 5) Realizar estudios de fertilidad de niveles de nitrógeno en los suelos, después del cultivo de las especies materia del presente experimento.
- 6) La conservación de los suelos de la microcuenca de San Pedro Mixtepec, debe ir acompañada de un cambio en la conciencia individual de los productores para desechar prácticas añejas de destrucción medioambiental, y optar por tecnologías baratas y de menor impacto ecológico, todo lo cual debe ir soportado por trabajo de investigación y capacitación.

## CAPÍTULO VIII. BIBLIOGRAFÍA

- (1) Allison, L., Brown, J., Hayward, H. 1985. *Diagnóstico y Rehabilitación de Suelos Salinos y Sódicos*. Laboratorio de salinidad del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América. Editorial LIMUSA, 4ª. Reimpresión. México. 89-107 págs.
- (2) Anaya L. 1980. *La vegetación y los suelos de un transecto altitudinal del declive occidental*. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México. 67 Págs.
- (3) Bennett, H. 1974. *Elementos de Conservación de Suelos*. Fondo de Cultura Económica. México, D. F. 427 págs.
- (4) Buol, S.W., Hole, F.D., MaCracken, R.J. 1981. *Génesis y clasificación de suelos*. Ed. Trillas. México. 417 Págs.
- (5) Bergsma E. 1983. *Photointerpretation for soil erosion and conservation surveys*. I.I. A. S. E. S. Enschede Holland.
- (6) Buckman, O., y Brady, C. 1977. *Naturaleza y Propiedades de los suelos*. Montaner y Simón, S. A. Editores, 2ª. Edic. Traducida por R. Salord Barceló. Barcelona, España. 1-17 págs.
- (7) Comisión Nacional Forestal. 2004. *Manual de obras y prácticas de protección, restauración y conservación de suelos forestales*. Jalisco, México. 210 Págs.
- (8) Clarke, F.W. 1924. Data of geochemistry, 5<sup>th</sup> ed. U.S. Geol. Survey Bull. 770. Dep. Interior, U.S. Govt. Printing Office, Washington. 27-38 Págs.
- (9) CP-SARH. (Colegio de Postgraduados-Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos). 1991. *Manual de conservación del suelo y agua*. México, D.F. 584 Págs.
- (10) De Scerna, Z. 1965. *Reconocimiento geológico en la Sierra Madre del Sur de México, entre Chilpancingo y Acapulco, Estado de Guerrero*. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología. 77 págs.
- (11) Duchaufour, P. 1977. *Dynamics of forest soil under Atlantic climate*. École Nationale des Eaux et Forêts. Nancy, Francia. 266 Págs.
- (12) Diéguez A., Barrio A., Castedo D. F., Ruíz G., Álvarez T., Álvarez G., Rojo A. 2003. *Dendrometría*. Fundación Conde del Valle de Salazar. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 327 Págs.
- (13) Departamento de Agricultura de Estados Unidos. 1990. *Claves para la taxonomía de suelos*, (Traducción), México CP e IMTA.

- (14) Folkard, G.K.; Sutherland, J.P. 1994. *Moringa oleifera* a multipurpose tree. Footsteps 20:14-1. 5 Págs.
- (15) Fitzpatrick, L.A. 1971. *Pedology. A Systematic Approach to Soil Science*. Oliver & Boyd. 306 págs.
- (16) Fuentes S. y Martínez O. 2001. *Manual Técnico de Estabilización y Forestación de Cárcavas en Cuencas Hidrográficas*. Agrinfor. La Habana, Cuba. 43 págs.
- (17) FitzPatrick, E. 1984. *Suelos. Su formación, clasificación y distribución*. CECSA. D. F. 430 Págs.
- (18) FAO. 1999. *Agroforestería para la producción animal en América Latina*. Memorias de una conferencia electrónica realizada de Abril a Septiembre de 1998/ moderada por Mauricio Rosales Méndez, *et al.*
- (19) Flores E. 1991. *Desarrollo agrícola*. Fondo de Cultura Económica. México. 468 Págs.
- (20) Foth, D. Henry 1990. *Fundamentos de la ciencia del suelo*. Compañía editorial continental, S.A. de C.V., México. 433 Págs.
- (21) García J., Ordoñez M., Briones S. 2004. *Biodiversidad de Oaxaca*. UNAM. IB-FOCN-WWF. 605 Págs.
- (22) Gavande, S. 1979. *Física de suelos*. Limusa. México. 17-104 Págs.
- (23) García, E. 1988. *Modificaciones al sistema Köppen-García (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. Offset Larios. México, D.F. 219 Págs.
- (24) Hilgard, E.W. 1982, *A report on the relations of soil to climate*. U.S. Dept. Agr. Weather Bull. 3: 1-59 Págs.
- (25) Hudson, N. 1982. *Conservación de Suelos*. Reverté. Barcelona, España. 335 págs.
- (26) INEGI, 2004. *Síntesis de Información Geográfica del Estado de Oaxaca*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 1-90 Págs.
- (27) ICRAF, 1993. Centro Internacional para la Investigación en Agroforestería. Reporte anual 1995. ICRAF, Nairobi, Kenya.
- (28) Jenny, H. 1941. *Factores de formación del suelo*. McGraw-Hill. New York. 395 Págs.
- (29) Krishnamurthy, L., Ávila M. 1999. *Agroforestería básica*. Red de Formación Ambiental. México. 340 págs.
- (30) León, A. 2006. *Nueva Edafología*. 3ª. Edición. México. 484 págs.

- (31) MAB - UNESCO, 1979. *Carte de la répartition mondiale des régions arides*. Notes techniques du MAB. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. No.7
- (32) Moment, E. y Habermann, A. 1974. *Biology: A full spectrum*. Wiley & Sons. New York. 292 págs.
- (33) Martínez, G. 1994. *Experimentación agrícola*. Métodos estadísticos. Universidad Autónoma Chapingo. México. 362 Págs.
- (34) Martínez, M., Rubio, E. 2001. *Tecnología para la Conservación de Suelos en los Programas de Manejo de Cuencas*. Diplomado de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas. 28 Págs.
- (35) Nair, R. 1997. *Agroforestería*. Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo, México. 543 págs.
- (36) Nair, R. 1985. *Clasificación de sistemas agroforestales*. Sistemas agroforestales 3: 97-128 Págs.
- (37) Pritchett, W.L., and R.F. Fisher. 1988. *Properties and Management of Forest Soils*. 2 ed. John Wiley & Sons. New York, USA. 494 págs.
- (38) Parrota, J. 1993. *Moringa oleífera*. Lam. Resedá, horseradish tree. SO-ITF-SM-61. New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. 6 págs.
- (39) Palacios-Mayorga S. y Gama-Castro. J.E. 1994. Capítulo del libro: *Las Ciencias de la Tierra Sólida Hoy*, Eds. UNAM y el Fondo de Cultura Económica, 205 págs.
- (40) Pinto, R. 2000. *Manual de Edafología*. 4 ed. Alfaomega. 267 Págs.
- (41) Porta, C., López, A., Roquero, C. 2003. *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. 3 ed. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 929 Págs.
- (42) Raymond, E. D., and Kelly, W. J. 1982. *Topografía Elemental*. Edit. CECOSA, 8ª. Reimpresión. Traducido por José Luis Lepe Saucedo. México. 632 págs.
- (43) Ruíz, C. 1996. *Evaluación del Establecimiento de Bancos de Proteína de Leucaena leucocephala en el Municipio de Comala Colima, México*. Tesis de Posgrado. Universidad de Colima. 65 págs.
- (44) Richards, L.A. 1980. *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos*. Departamento de Agricultura de los EEUU, Laboratorio de Salinidad. Limusa S.A., México. 172 Págs.

- (45) Romahn, de la Vega., Ramírez, M., Treviño, G. 1994. *Dendrometría*. Universidad Autónoma Chapingo. México. 354 Págs.
- (46) Scoot, R.R. 1977. *Plant Root Systems: Their función and interaction with the soil*. McGraw-Hill Book Company (UK) Limited. Great Britain. 30-61 págs.
- (47) Strogonov, B.P. 1964. *Physiological basis of salt tolerance of plants (as effected by various types of salinity)*. Academy of Sciences. Moscow, USSR. Israel Program for Scientific Traslations. Jerusalem, Israel. 1-256 págs.
- (48) Szabolcs, I. 1989. *Salt Affected Soils*. CRC. Press Inc. Boca Ratón, Florida, USA. 1-101 págs.
- (49) Sánchez, B.E., Estrada, V.C. y Sandoval, O. G. 2006. *Diagnóstico de la infraestructura hidráulica y sanitarias de las Cuencas de los Ríos Copalita y Tonameca*. Reporte técnico N° 2. Universidad del Mar-CONAGUA. México. 61 Págs.
- (50) Soto-Pinto. 1998. *Agroforestería para la conservación de suelos en Los Altos de Chiapas*. Memorias del Seminario sobre manejo de suelos tropicales en Chiapas. Cuaderno de Divulgación 2o Seminario. ECOSUR. San Cristóbal de Las Casas. 192 Págs.
- (51) Sánchez, B., y Llerena, V. 2006. Curso: *Manejo Integral de Cuencas. Conservación de suelo y agua. Técnicas y obras de conservación*. Consejo de cuenca de la costa de Oaxaca. 47 Págs.
- (52) Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2002. *Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad, clasificación de suelos, estudios, muestreo y análisis*. México. 147 Págs.
- (53) Sánchez, B. E. y Sandoval, O.G. 2005. *Estudio geohidrológico para determinar la localización de un pozo profundo en la localidad de Santa Cruz, San Pedro Mixtepec, Oaxaca*. Reporte técnico N° 1. Coordinación de Promoción al Desarrollo. Universidad del Mar. 1-9 Págs.
- (54) Torquebiau, E. 1993. *Concepto de Agroforestería. Una introducción*. Traducido por Carlos Cano. Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo. México. 91 págs.
- (55) Tisdale, S.L.; Nelson, W.L. 1970. *Fertilidad de Suelos y Fertilizantes*. Montaner y Simon. Barcelona, España. 760 págs.
- (56) Tolson, G. 1998. *Deformación, exhumación y neotectónica de la margen continental de Oaxaca: Datos Estructurales, Petrológicos y Geotermobarométricos*: México, D. F., Colegio de Ciencias y Humanidades, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis doctoral, 96 p.

- (57) Torres, R. y Magaña, T. 2005. *Evaluación de plantaciones forestales*. Limusa. México. 472 Págs.
- (58) Villanueva, M.J. 2002. *Microcuencas*. Universidad Autónoma Chapingo. México. 222 págs.
- (59) Young, A. 1997. *Agroforestry for soil management*. 2nd. Oxon; CAB International. 320 Págs.
- (60) Yanggen, D., Antle J., Valdivia R. 2003. *Análisis Económico de los Subsidios y la Adopción Sostenible de las Tecnologías de Conservación Agrícola: Un Marco Conceptual y un Estudio de Caso de las Terrazas en los Andes de Perú*. III Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográficas. 18 págs.
- (61) Agrodesierto. Programas Agroforestales. *Moringa oleífera*. Consultado el 20/03/06. Disponible en: <http://www.agrodesierto.com/moringa.html>.
- (62) Augusto, B. 2005. *Evaluación preliminar del estado de contaminación en suelos de la provincia del Neuquén donde se efectúan actividades de explotación hidrocarburífera*. Tesis. Documento en línea. Disponible en: [www.tesis.bioetica.org/pab4.htm](http://www.tesis.bioetica.org/pab4.htm).
- (63) James, A. 1983. *Manual de Cultivos Energéticos*. Consultado el 15/05/07. Disponible en: [www.hort.purdue.edu/newcrop/duke\\_energy/Moringa\\_oleifera](http://www.hort.purdue.edu/newcrop/duke_energy/Moringa_oleifera).
- (64) Zárate, R. 1987. *Leucaena leucocephala*. Consultado el 25/03/06. Disponible en: [http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info\\_especies/arboles/doctos/44-legum26m.pdf](http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/44-legum26m.pdf).
- (65) Mattos, R. 1999. *Pequeñas obras Hidráulicas*. UNESCO. Consultado el 25/03/08. disponible en: <http://www.unesco.org.uy/phi/libros/obrashidraul/index.html>
- (66) Santiago, J. Evelinda. 2005. *Producción Local y Procesos Productivos Sustentables*. Consultado el 26/04/07. Disponible en: <http://www.eumed.net/tesis/esj/index.htm>

## ANEXO FOTOGRÁFICO



Figura 1-a. trazo de curvas a nivel en el terreno.



Figura 2-a. Curvas de nivel en la parcela experimental



Figura 3-a. Vista original de la parcela experimental.



Figura 4-a. Trazo de curvas de nivel y lote de escurrimiento.



Figura 5-a. Vista horizontal del lote de escurrimiento



Figura 6-a. Vista vertical del lote de escurrimiento



Figura 7-a. Vista de las terrazas



Figura 8-a. Vista de las terrazas



Figura 9-a. La parcela experimental



Figura 10-a. Construcción de las terrazas en la parcela demostrativa



Figura 11-a. Pasta de saturación del suelo



Figura 12-a. Pesando muestras de suelo



Figura 13-a. Extracción de sustrato de suelo



Figura 14-a. Bomba de vacío



Figura 15-a. Titulación de Calcio



Figura 16-a. Muestra de suelo después del centrifugado



Figura 17-a. Preparación de muestras para la titulación



Figura 18-a. Titulación con EDTA



Figura 19-a. Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico



Figura 20-a. Semillas de *Moringa oleifera*



Figura 21-a. Siembra de semillas de *Moringa* y *Leucaena*



Figura 22-a. Plántula de *Moringa*



Figura 23-a. Plántula de *Leucaena*



Figura 24-a. Plantas de *Leucaena* (Izq.) y *Moringa* (Der.)



Figura 25-a. Preparación del terreno para plantar



Figura 26-a. Realizando la plantación



Figura 27-a. Plantando sobre las terrazas



Figura 28-a. La *Leucaena* en el sistema agroforestal con terrazas



Figura 29-a. La *Moringa* en el sistema agroforestal con terrazas



Figura 30-a. El sistema agroforestal en terrazas



Figura 31-a. Deshierbe del sistema agroforestal



Figura 32-a. La *Leucaena* a cuatro meses de su plantación



Figura 33-a. La *Moringa* a cuatro meses de su plantación



Figura 34-a. Etapa de Floración de la *Leucaena* a los seis meses de su plantación



Figura 35-a. Etapa de floración de la *Moringa* a 6 meses de su plantación