



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO



DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

POSGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

**PROPUESTA PARA EL MONITOREO DE LA EROSIÓN HÍDRICA
EN ECOSISTEMAS FORESTALES**

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN CIENCIAS FORESTALES**

Presenta:

Moisés Matías Ramos

Bajo la supervisión de:

Dr. Jesús David Gómez Díaz



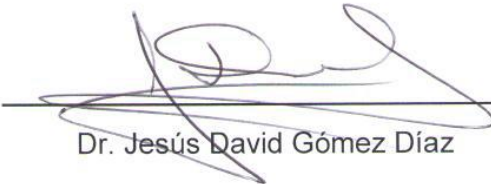
Chapingo, Estado de México, Diciembre de 2016

**PROPUESTA PARA EL MONITOREO DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN
ECOSISTEMAS FORESTALES**

Tesis realizada por **Moisés Matías Ramos** bajo la supervisión del Comité Asesor
indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener
el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN CIENCIAS FORESTALES**

DIRECTOR:



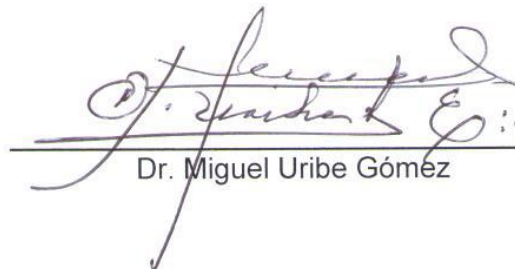
Dr. Jesús David Gómez Díaz

CODIRECTOR:



Dr. Alejandro I. Monterroso Rivas

ASESOR:



Dr. Miguel Uribe Gómez

ÍNDICE

ÍNDICE.....	ii
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE CUADROS	vi
ABREVIATURAS	vii
DEDICATORIA	viii
AGRADECIMIENTO	ix
DATOS BIOGRÁFICOS.....	x
RESUMEN GENERAL.....	11
GENERAL ABSTRACT.....	12
1 INTRODUCCIÓN.....	13
2 REVISIÓN DE LITERATURA	15
2.1 Degradación de los suelos en México	15
2.2 Tipos de degradación de suelos.....	17
2.2.1 Degradación física.....	17
2.2.2 Degradación Química.....	18
2.2.3 Erosión eólica.....	18
2.2.4 Erosión hídrica	19
2.3 Factores de la erosión	20
2.3.1 Clima.....	20
2.3.2 Erosionabilidad del suelo	21
2.3.3 Pendiente y longitud de la ladera	22
2.3.4 Cubierta del suelo	23

2.3.5	Tipo de suelo.....	23
2.3.6	Manejo del suelo	24
2.3.7	Factores clave que determinan la erosión hídrica del suelo.....	25
2.4	Metodologías utilizadas para la medición de la erosión hídrica del suelo	25
2.5	Referencias	28
3	FACTORES QUE INFLUYEN EN LA EROSION HÍDRICA DEL SUELO EN DOS ECOSISTEMAS FORESTALES.....	31
	RESUMEN	31
	ABSTRACT	32
3.1	INTRODUCCIÓN.....	33
3.2	MATERIALES Y MÉTODOS	35
3.2.1	Descripción de los sitios de estudio	35
3.2.2	Selección de puntos de muestreo	36
3.2.3	Parcela de muestreo	39
3.2.4	Levantamiento y procesamiento de datos.....	40
3.2.4.1	Información general del sitio de estudio	40
3.2.4.2	Cobertura forestal	41
	Cobertura arbórea	41
	Cobertura del piso forestal.....	41
	Biomasa del piso forestal.....	42
	Área basal	42
	Variables edáficas	42
3.2.4.3	Variables de erosión	43
	Pedestales	43
	Canalillos y Cárcavas	43

3.2.5	Análisis estadístico.....	44
3.3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
3.3.1	Bosque templado (Zoquiapan, México).....	46
3.3.2	Selva Baja Caducifolia (Ajuchitlán, Morelos).....	49
3.3.3	Cobertura forestal.....	51
3.3.4	Variables edáficas	52
3.4	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	54
3.4.1	Bosque templado (Zoquiapan, México).....	54
3.4.2	Selva Baja Caducifolia (Ajuchitlan, Morelos).....	59
3.5	CONCLUSIONES	64
3.6	REFERENCIAS	66
4	PROPUESTA DE MONITOREO.....	71
5	CONCLUSIONES GENERALES	75
6	APÉNDICE	77
6.1	ÁLBUM FOTOGRÁFICO	77
6.2	FORMATO DE CAMPO.....	82
6.3	CÓDIGO UTILIZADO PARA LAS VARIABLES EN LOS ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Degradación del suelo en México.....	16
Figura 2. Unidades biofísicas de Zoquiapan, México.....	36
Figura 3. Unidades biofísicas de Ajuchitlán, Morelos. Fuente: Ruiz, 2015.	37
Figura 4. Parcela de muestreo.....	40
Figura 5. Matriz de correlación para las variables de Zoquiapan, México.	54
Figura 6. Regresión lineal entre; a) Pendiente y pedestales, b) Porcentaje de roca y pedestales, c) Profundidad del suelo y pedestales, d) Materia orgánica y pedestales y e) Densidad aparente y pedestales para Zoquiapan, México.	56
Figura 7. ACP para las variables de Zoquiapan, México.	57
Figura 8. Matriz de correlación para las variables de Ajuchitlán, Morelos.	60
Figura 9. regresión lineal entre; a) Pendiente y pedestales, b) Biomasa de la vegetación y pedestales, c) Vegetación y pedestales, d) Suelo expuesto y pedestales, e) Roca y pedestales, f) Densidad aparente y pedestales para Ajuchitlán, Morelos.....	61
Figura 10. ACP para las variables de Ajuchitlán, Morelos.	62
Figura 11. Propuesta de parcela de muestreo.	72

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Puntos de muestreo para Zoquiapan, México.	38
Cuadro 2. Puntos de muestreo para Ajuchitlán, Morelos.	38
Cuadro 3. Resultados de datos generales y de cobertura en Zoquiapan, México.	46
<i>Cuadro 4. Resultado de variables edáficas en Zoquiapan, México.</i>	<i>48</i>
Cuadro 5. Resultado de las variables de erosión medidas en Zoquiapan, México.	48
Cuadro 6. Resultados de datos generales y de cobertura en Ajuchitlán, Morelos.	49
Cuadro 7. Resultado de variables edáficas en Ajuchitlán, Morelos.	50
Cuadro 8. Resultado de las variables de erosión medidas en Ajuchitlán, Morelos.	50
Cuadro 9. Variables más correlacionadas para Zoquiapan, México.	55
Cuadro 10. Variables más correlacionadas para Zoquiapan, México.	60

ABREVIATURAS

ACP: Análisis de Componentes Principales

Biom.: Biomasa

Biom. Veg: Biomasa de la vegetación

Cob.: Cobertura

DAP: Densidad aparente

Esp.: Espesor

Esp. Mant.: Espesor del Mantillo

Et al.: Y otros

ha: hectárea

MPA: Megapascuales

M.O.: Materia Orgánica

pH: Potencial Hidrógeno

P.M.A: Precipitación Medio Anual

Rep.: Repetición

Vol. Volumen

DEDICATORIA

A mi esposa Patricia, mis hijas Yamili y Denise, “mi querida familia”, por el gran apoyo y por ser el pilar para alcanzar este nuevo logro.

A mis padres Don Lencho y Doña Lola, mis hermanas Antonia y Angelina por estar siempre apoyándome, sin duda lo ahora alcanzado es el reflejo de la educación que me fue concedido por ustedes.

A mis sobrinas Yesenia, Yaneisi y Vanesa por contagiarme su alegría y animarme cada vez que nos saludamos.

En mi mente y mi corazón siempre estaré agradecido con el Sr. que en vida llevó el nombre de Benito Mendoza Martín por inculcarme los valores y la importancia de seguir estudiando. Le estaré eternamente agradecido.

A mi comité asesor, gracias por confiar en mí, brindarme su amistad y por el apoyo otorgado en todo momento para culminar este trabajo.

A mis amig@s gracias por acompañarme en esas etapas de mi vida, sin duda fueron un peldaño en este logro concretado.

AGRADECIMIENTO

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por ser impulsora de la investigación motivo por el cual esta trabajo se ve culminado con éxito.

A esta magnífica casa de estudio la Universidad Autónoma Chapingo y su Posgrado en Ciencias Forestales por brindarme una educación de calidad y arroparme en este nuevo nivel de estudio.

Al Dr. Jesús David Gómez Díaz por todo el apoyo otorgado desde que se concretó la base para iniciar este proyecto y su seguimiento a la par hasta su culminación, me siento muy agradecido ya que es una persona comprometida con la investigación.

Al Dr. Alejandro I. Monterroso Rivas por sus valiosas aportaciones y estar siempre al pendiente de este trabajo de investigación el cual refleja su compromiso e interés con el desarrollo profesional.

Al Dr. Miguel Uribe Gómez por su disposición, sus correcciones acertadas y aportar mejoras a esta tesis.

Al MC. Bartolo de J. Villar-Hernández por sus aportaciones en el análisis estadístico.

A la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) por facilitar los instrumentos que fueron muy importantes en el levantamiento de la información de campo.

Agradezco el apoyo recibido por pobladores de Ajuchitlán y trabajadores del campo experimental de Zoquiapan.

Le doy muchas gracias a Susa, Sonia, Lupita y Gabriel por conformar la cuadrilla de campo.

A Patricia Ruíz García muchas gracias por las aportaciones e ideas para mejora del trabajo.

Agradezco el apoyo del personal de los laboratorios de “física de suelos” y “génesis, morfología y clasificación de suelos”.

A la maestra Ileana Ebergenyi por apoyarme en la traducción al inglés.

Gracias Liz por tu disponibilidad en apoyarme en el formato del trabajo.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

- Nombre: Moisés Matías Ramos
- Fecha de nacimiento: 15 de octubre de 1984
- Lugar de nacimiento: Comitán, Chiapas
- CURP: MARM841015HCSTMS06
- Profesión: Ingeniero en Restauración Forestal
- Cédula Profesional: 9692649



Desarrollo académico

- Bachillerato: Preparatoria Agrícola por la Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Edo. de México.
- Licenciatura: Ingeniero en Restauración Forestal por la Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Edo. de México.

Desarrollo Profesional

- 2015. Participación en el proyecto FAO-CONAFOR-UACH “Mejora de la información para promover el manejo forestal para la protección del suelo y del agua”.
- 2013-2014. Apoyo técnico en el inventario de captura de carbono en un Bosque Mesófilo de Montaña y una Selva Baja caducifolia.
- 2012-2013. Apoyo en la elaboración de estrategias para el manejo del fuego para el programa de manejo de las barrancas del Distrito Federal.
- 2012. Encargado del establecimiento de plantaciones y manejo silvícola en la empresa Promotora de Plantaciones del Sureste (PROPLANSE).

RESUMEN GENERAL

PROPUESTA PARA EL MONITOREO DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN ECOSISTEMAS FORESTALES

Tomando en cuenta la importancia del monitoreo de la erosión hídrica del suelo en áreas forestales, se realizó este trabajo en un bosque templado (Zoquiapan, México) y una selva baja (Ajuchitlán, Morelos) con el objetivo de seleccionar variables que influyan en la erosión del suelo para construir, con las variables seleccionadas, un método de monitoreo fácil de aplicar y replicable en ecosistemas diferentes, para obtener información confiable. Los resultados obtenidos revelaron que en el primer sitio la pendiente ($R^2 = .34$ y $p\text{-valor} = .0976$), el porcentaje de roca ($R^2 = .33$ y $p\text{-valor} = .1080$) presente en el piso forestal y la densidad aparente ($R^2 = .42$ y $p\text{-valor} = .0573$) tuvieron correlación positiva con la variable respuesta, mientras que resultaron con una correlación negativa las variables de profundidad del suelo ($R^2 = .23$ y $p\text{-valor} = .1926$) y el porcentaje de materia orgánica ($R^2 = .20$ y $p\text{-valor} = .2248$); con el Análisis de Componentes Principales (ACP) resultaron también importantes las variables de porcentaje de suelo desnudo, compactación e infiltración, las primeras dos con correlación positiva y la infiltración con correlación negativa. Para la vegetación de Selva baja caducifolia resultaron importantes en el primer análisis con una correlación positiva las variables de pendiente del terreno ($R^2 = .70$ y $p\text{-valor} = .0049$), porcentaje de suelo expuesto ($R^2 = .38$ y $p\text{-valor} = .0748$), porcentaje de roca presente ($R^2 = .34$ y $p\text{-valor} = .0998$) y la densidad aparente ($R^2 = .32$ y $p\text{-valor} = .1109$) y con correlación negativa las variables de vegetación ($R^2 = .52$ y $p\text{-valor} = .0291$) y la biomasa de esta ($R^2 = .52$ y $p\text{-valor} = .0277$), al realizar el ACP la variable profundidad del suelo resultó importante. Las variables evaluadas que tuvieron mejor correlación con la variable respuesta fueron consideradas para la propuesta de monitoreo.

Palabras clave: Monitoreo, Erosión hídrica, suelo, ecosistemas forestales, método, variables, estrategias.

Tesis de maestría en ciencias en ciencias forestales, Universidad Autónoma Chapingo.
Autor: Moisés Matías Ramos
Director de tesis: Dr. Jesús David Gómez Díaz

GENERAL ABSTRACT

Considering the importance of monitoring hydric erosion of soil in forest areas, the present work was carried out in a temperate forest (Zoquiapan, State of Mexico), and a low deciduous rain forest (Ajuchitan, State of Morelos) aiming at selecting variables influencing soil erosion in order to construct, with these variables, a method easily applicable and replicable on various ecosystems, to obtain sound information on soil erosion. Results indicate that, for the first site, slope ($R^2=.34$ and $p\text{-value}=.0976$), percentage of rock ($R^2=.33$ and $p\text{-value}=.1080$) present in forest floor, and apparent density ($R^2=.42$ and $p\text{-value}=.0573$) had a positive correlation with the response variable, while soil depth ($R^2=.20$ and $p\text{-value}=.1926$) and percentage of organic matter ($R^2=.20$ and $p\text{-value}=.2248$) had a negative correlation; Main Component Analysis (ACP) pointed as also important variables: percentage of uncovered soil, compacting, and infiltration, the first two showing positive correlation and the third showing a negative one. For the low deciduous rain-forest site, variables showing positive correlation were: slope ($R^2=.70$ and $p\text{-value}=.0049$), percentage of uncovered soil ($R^2=.38$ and $p\text{-value}=.0748$), percentage of rock present ($R^2=.34$ and $p\text{-value}=.0998$), and apparent density ($R^2=.32$ and $p\text{-value}=.1109$), while those showing negative correlation were: vegetation ($R^2=.52$ and $p\text{-value}=.0291$), and its biomass ($R^2=.52$ and $p\text{-value}=.0277$); ACP pointed to soil depth as also important. Those variables showing the highest correlation with the response variable were considered for the proposed monitoring method.

Key words: Monitoring, hydric erosion, soil, forest ecosystem, method, variables, strategies.

1. INTRODUCCIÓN

A medida que la población humana que habita nuestro planeta va incrementando, cada uno de los individuos que aquí moramos además de las generaciones futuras tenemos requerimientos que finalmente obtenemos de nuestro entorno, es así que las necesidades incrementan considerablemente causando que se ejerza cada vez mayor presión sobre los recursos naturales y uno de los componentes del medio que está siendo severamente afectado es el recurso suelo principalmente cuando no se le da el manejo adecuado.

Son muchas las consecuencias de un mal manejo que repercuten directamente en el suelo; entre éstas destacan la erosión, compactación, salinidad, encostramiento, disminución de fertilidad, etc., todas estas pueden ser englobadas en una sola: la degradación del suelo (Moreno *et al.*, 2003). De acuerdo con un segundo estudio realizado por la SEMARNAT-CP (2003) donde se evaluó de manera directa cuatro procesos de degradación del suelo, el 44.9% de los suelos del país estaban afectados por algún proceso de degradación. La degradación química ocupaba el primer lugar (34.04 millones de ha, 17.8% del territorio nacional), seguida por la erosión hídrica (22.72 millones de ha, 11.9%), eólica (18.12 millones de ha, 9.5%) y, al final, la degradación física (10.84 millones de ha, 5.7%). Los suelos sin degradación aparente se encontraban en 55.1% del país (105.2 millones de ha), en un estudio más reciente realizado por CONAFOR-UACH (2013) se deduce que el 67.74% del país presenta erosión (en diferentes grados) de donde la erosión hídrica se presenta en 20% del territorio, la eólica con el 34.94%, la degradación química con el 8.1% y con menor superficie la física con 4.7%

La erosión hídrica es uno de los problemas que afecta severamente a los suelos en nuestro país y se presenta por muchos factores, en el que destaca la

eliminación de la cubierta vegetal que protege al suelo de los impactos del agua de lluvia directamente y le provee protección para disminuir el escurrimiento superficial y facilitar la infiltración del agua. Basándose en que la erosión se comporta de manera diferente dependiendo del tipo de vegetación presente en el sitio se realizó este estudio en dos sitios con vegetación diferente, una en un Bosque templado y otro en una Selva Baja Caducifolia en donde se recabó información de las variables clave que influyen en la erosión del suelo, los cuales fueron seleccionados de trabajos previos con la finalidad de obtener un listado de datos y su efecto en la erosión para proponer una metodología que sea fácil de utilizar y replicar en vegetaciones diferentes, en este caso al menos en los dos tipos de vegetación bajo estudio con la medición de las variables necesarias que expliquen la erosión del suelo, que dé como resultado una propuesta de monitoreo. El monitoreo de la severidad de la degradación en las áreas forestales debe ser evaluada para proponer las estrategias adecuadas de protección del suelo y del agua.

Por lo tanto el objetivo de esta investigación es “Generar las bases para el monitoreo de la erosión hídrica del suelo en dos sitios con biomas diferentes mediante la integración de variables edáficas, fisiográficas y de cobertura vegetal”, este objetivo será alcanzado mediante la selección las variables edáficas y de paisaje que determinen la degradación del suelo así como estrategias de medición en campo para identificar los procesos degradativos, además de la previa identificación de variables de cobertura vegetal y sus estrategias de medición en campo para detectar su influencia en la protección del suelo finalmente la Integración y el análisis de estas variables edáficas y de cobertura vegetal medidas en campo, además de información climática y fisiográfica en un sistema de información geográfico para establecer la propuesta de monitoreo.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Degradación de los suelos en México

Son diversos los bienes y servicios que obtenemos del recurso suelo, participa en varios procesos como el ciclo del agua, ciclos biogeoquímicos, regulación del clima, producción de biomasa mediante la generación de alimentos entre muchos más, es así que este recurso natural es muy importante para mantener la vida en la tierra, sin embargo a pesar de estos beneficios se le está dando un uso inadecuado que lo conlleva a su degradación.

El termino degradación es un concepto muy referido por investigadores que abordan el tema y existen a su vez varias percepciones sobre el significado que a final de cuentas recae en el mismo contexto, he aquí algunas definiciones. La degradación de la tierra es un conjunto de procesos dinámicos (físicos, químicos y biológicos) que afectan la productividad de los ecosistemas. Esta degradación se relaciona con el uso inadecuado de los recursos agua, suelo, flora y fauna; los dos primeros son la base fundamental para el abastecimiento de alimentos para las plantas, los animales y el hombre (Ortiz *et al.*, 1994). La Comisión Nacional Forestal “CONAFOR” por sus siglas en español (2014) señala que la degradación de suelos es un grupo de procesos que ocasionan su deterioro los cuales provocan una disminución en su productividad biológica o de su biodiversidad. Cuando se habla de la degradación del suelo se hace referencia a los procesos inducidos por las actividades humanas que provocan la disminución de su productividad biológica o de su biodiversidad, así como la capacidad actual y/o futura para sostener la vida humana (Oldemann, 1988).

En base a un estudio realizado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y el Colegio de Postgraduados (CP) en el 2003, el 44.9% de los suelos del país estaban afectados por algún proceso de degradación. Se puede observar en la Figura 1 que la degradación química ocupaba el primer lugar (34.04 millones de ha, 17.8% del territorio nacional), seguida por la erosión hídrica (22.72 millones de ha, 11.9%), eólica (18.12 millones de ha, 9.5%) y, al final, la degradación física (10.84 millones de ha, 5.7%). Los suelos sin degradación aparente se encontraban en 55.1% del país (105.2 millones de ha).

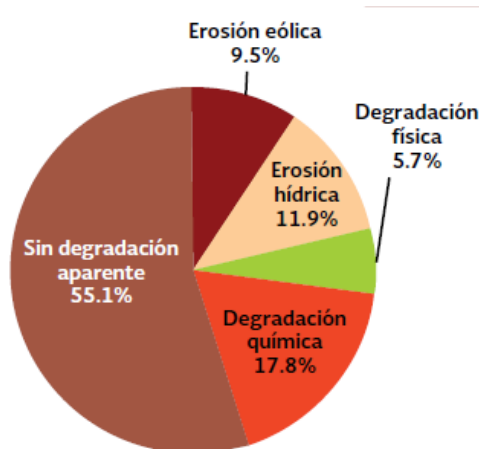


Figura 1. Degradación del suelo en México.

En la línea base nacional de degradación de tierras realizado por la CONAFOR-UACH (2013) se obtuvo un indicador integrado de degradación a través de análisis de los factores de la erosión obteniendo como resultado que el 36.98% de la superficie tiene degradación nula y el 63.02% presenta degradación en las siguientes categorías; ligera el 24.21%, moderada el 27.20% siendo esta la que ocupa mayor superficie, severa el 10.01% y extrema el 1.59%. Además se deduce que el 67.74% del país presenta erosión por los siguientes procesos: erosión hídrica en 20% del territorio, la eólica con el 34.94%, la degradación química con el 8.1% y con menor superficie la física con 4.7%.

Los estudios mencionados previamente resaltan la importancia del problema de la degradación en el país los cuales afectan en gran medida los suelos en las

diferentes tipos de erosión y degradación que se presentan dependiendo del lugar, uso, clima, etc.

2.2. Tipos de degradación de suelos

2.2.1. Degradación física

Se refiere a la alteración del funcionamiento físico del suelo que se puede manifestar por la reducción del volumen útil, disminución del espacio poroso, modificación del arreglo estructural, baja la estabilidad de agregados del suelo, provoca el encostramiento y sellado que impide el intercambio de gases y agua provocando que el suelo no funcione adecuadamente ya que se afecta la capacidad de transmisión de fluidos, el volumen de almacenaje y modifica el balance adecuado de agua y gases importantes para disolver los nutrientes que necesitan las plantas y los microorganismos (Topp *et al.*, 1997).

La degradación física es el proceso menos extendido en el país, debido a que afecta a cerca de 6% de la superficie nacional; sin embargo, tiene un alto impacto debido a que es prácticamente irreversible y conlleva a la pérdida de la función productiva de los terrenos. En escala estatal, la entidad más afectada en términos relativos a su territorio, fue Tabasco (38.4%) y las entidades menos afectadas fueron Coahuila, Sonora, Querétaro, Nuevo León y Michoacán con menos de 2% cada una de ellas. Con respecto a los niveles presentes en la degradación física, el extremo se presentó en 1.2 millones de ha (11% de la superficie nacional afectada); el fuerte en 587 mil (5.4%); el moderado en 2.33 millones (21.5%) y el ligero en 6.72 millones (SEMARNAT, 2012). La superficie afectada por degradación física a nivel nacional ocupa el 4.7% el cual se clasifica en nula la gran parte de superficie evaluada al cual le corresponde el 95.3% (CONAFOR-UACH, 2013).

2.2.2. Degradación Química

La degradación química del suelo está referido a un cambio indeseable en las características químicas de este causando la declinación de la calidad del suelo principalmente por las intervenciones humanas estas abarca la perdida de nutrientes, salinización, acidificación, entre otros (Osman, 2014).

La degradación química fue el proceso de degradación del suelo más extendido en el país en el año 2002, con alrededor de 34.04 millones de ha (17.8% del territorio). Considerando los niveles de degradación, el ligero está en 55% de la superficie nacional con este tipo de degradación; el moderado, en 43.2% y el fuerte y extremo en conjunto, sumaron el 1.8%. Si se analiza por entidad federativa, se observa que está presente en todo el país, en un rango que va de 1.9% de la superficie estatal en Baja California Sur hasta 55.1% en Yucatán (SEMARNAT, 2012).

En la línea base nacional de degradación de tierras reportan que la superficie afectada por este tipo de degradación ocupa el 8.1% a nivel nacional en sus diferentes categorías (CONAFOR-UACH, 2013).

2.2.3. Erosión eólica

Cuando el agente que influye sobre la desagregación, remoción y transporte de las partículas del suelo es el viento, entonces a este proceso erosivo se le conoce como erosión eólica y se presenta cuando la resistencia del suelo se ve debilitado y además es expuesto indefenso a la acción del viento en las superficies desnudas (Prego, 1962).

La erosión eólica afecta principalmente a las regiones áridas, semiáridas y subhúmedas secas del país, aunque no es exclusiva de ellas. Sus causas también se atribuyen a una insuficiente protección del suelo por la cubierta vegetal, a la destrucción de la estructura del suelo y a niveles bajos de humedad.

A escala nacional, 18.12 millones de ha (equivalentes al 9.5% del territorio) muestran evidencias de erosión eólica. Con respecto a los niveles de afectación por este tipo de erosión, del total nacional 66.7% se encuentra en nivel moderado, 29.5% en ligero y 3.9% entre fuerte y extremo (SEMARNAT, 2012).

Resultados del estudio realizado por SEMARNAT-UACH (2002) sobre la erosión eólica el 89% del territorio nacional, se ve afectado por este proceso. Las categorías son: ligera 7% entre 5-10 t ha⁻¹ al año, moderada 31% en un rango de 10-50 t ha⁻¹ al año, alta 33% en un rango de 50-200 t ha⁻¹ al año y muy alta 18% en la categoría mayor de 200 t ha⁻¹ al año, como conclusión obtuvieron que el 11% de la superficie del país no presenta problemas de pérdida de suelo por erosión eólica.

CONAFOR-UACH (2013) recalcularon la pérdida del suelo afectado por el viento verificando y actualizando los factores utilizados en el estudio realizado por SEMARNAT-UACH (2002) resultando entonces que el 34.94% del país se encuentra afectado con este problema. El 23% del porcentaje afectado toma la categoría de moderada afectación, el 5.86% en categoría alta, el 5.49% como ligera y el 0.5% como muy alto quedando un porcentaje del 65.06% sin erosión eólica aparente.

2.2.4. Erosión hídrica

La erosión hídrica se define como la remoción laminar o en masa de los materiales del suelo debido a la acción del agua de lluvia, la cual puede deformar el terreno y originar canalillos y cárcavas (SEMARNAT, 2012). Este tipo de erosión es un proceso degradativo que disminuye la productividad de los suelos afectados (Wilcox, 1994). La compleja topografía del territorio nacional es un factor que combinado con el manejo inadecuado de las tierras forestales, agrícolas y ganaderas, puede favorecer las escorrentías que erosionan las capas superficiales del suelo.

De la superficie nacional con erosión hídrica (22.73 millones de ha), 56.4% se encuentran en el nivel ligero, 39.7% en el nivel moderado y 3.9% entre fuerte y extremo. Al analizarlo a nivel estatal, en proporción a su superficie, obtuvieron como resultado que Guerrero tiene la mayor afectación con 31.8% de su territorio con erosión hídrica; mientras que Baja California Sur (0.03%), Baja California (0.1%) y Veracruz (1%) se encuentran entre las menos afectadas (SEMARNAT, 2012).

En el estudio realizado por SEMARNAT-UACH (2002) en el cual se determinó la erosión hídrica del suelo a escala 1:1 000 000 empleando como base la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE por sus siglas en inglés) arrojó que 42% de la superficie de la República Mexicana se encuentra afectada por erosión hídrica en las categorías siguientes: ligera 11% en un rango de 5-10 t ha⁻¹ al año, moderada 20% en un rango de 10-50 t ha⁻¹ al año, alta 8% en un rango de 50-200 t ha⁻¹ al año y muy alta el 3% en la categoría de mayor de 200 t ha⁻¹ al año. Y concluyó que 58% de la superficie nacional presenta una pérdida de suelo nula o en un rango de 0 a 5 t ha⁻¹ al año.

Finalmente en un estudio reciente realizado por la CONAFOR-UACH (2013) se recalculó la pérdida de suelo por efecto de la lluvia y escorrentía de acuerdo con los resultados que obtuvieron se determinó que alrededor del 20% de la superficie nacional presenta algún grado de erosión hídrica. La categoría ligera y moderada ocupan el 14.45% y 3.50% respectivamente, la categoría alta el 1.54% y por último el 0.46% en categoría muy alta.

2.3. Factores de la erosión

2.3.1. Clima

La lluvia es principal fenómeno climático que afecta directamente la erosión del suelo con el poder de desprendimiento de las gotas de agua que golpea la superficie del suelo causando erosión por canalillos, cárcavas y erosión laminar además de contribuir al escurrimiento superficial (Figueroa *et al.*, 1991).

El conocimiento detallado del sistema de lluvias es una información básica que se requiere para el diagnóstico correcto de los problemas de erosión y el diseño de obras para su control.

2.3.2. Erosionabilidad del suelo

La erosionabilidad de los granos individuales del suelo depende de: diámetro, densidad y forma, sin embargo, la mayor parte de los suelos constan principalmente de agregados que contienen partículas individuales que se mantienen unidas por diversas fuerzas. El estado y la estabilidad de estas unidades estructurales es lo que determina en gran medida la erosionabilidad del suelo. Si un suelo está bien estructurado, en número de partículas pequeñas que puede ser removida es muy bajo y la abrasión o desgaste es mínimo debido a que se desprenden pocos gránulos de suelo. Por el contrario, los suelos que tienen estructuras débiles y un amplio abastecimiento inicial de material erosionable pueden desgastarse rápidamente. Otros aspectos relacionados con la erosionabilidad del suelo son la humedad, textura, cementantes orgánicos y los procesos disgregantes (SEMARNAT-UACH, 2002). Se considera que la erosionabilidad varía en función de la textura del suelo, la estabilidad de los agregados, la resistencia al corte, la capacidad de infiltración y el contenido de materia orgánica y cementantes químicos del suelo (Figueroa *et al.*, 1991).

2.3.3. Pendiente y longitud de la ladera

El grado de la pendiente se define como el ángulo de inclinación de una ladera que puede ser expresado en grados o en porcentaje, la influencia de este factor se puede explicar por la fuerza de tracción del flujo de escurrimiento y la capacidad de transporte de sedimentos, por lo que al aumentar la pendiente la capacidad de transporte se incrementa rápidamente, así mismo, al disminuir la pendiente la capacidad de transporte disminuye (SEMARNAT-UACH, 2002).

La erosión aumenta conforme aumenta la inclinación y longitud de la pendiente como resultado de los aumentos en velocidad y volumen del escurrimiento superficial. Además, mientras que en un terreno plano las partículas salpican en todas direcciones, un terreno con pendiente la mayor parte de las partículas son salpicadas ladera abajo y aumenta conforme la pendiente aumenta (Figueroa *et al.*, 1991).

La longitud de la pendiente se define como la distancia desde el punto de origen de flujo sobre la superficie hasta que el gradiente de pendiente disminuye tal que ocurre la depositación o el escurrimiento alcanza un cauce o canal definido. La esorrentía aumenta cuando más alejado se esté de la cima, además se ha observado que la longitud de la pendiente contribuye a la erosión en canalillos. En cuanto a la forma del terreno, resultados analíticos demuestran que la erosión en pendientes uniformes aumenta gradualmente. En pendientes convexas las pérdidas son menores cerca de la cima de la pendiente pero aumenta rápidamente hacia las partes bajas de la pendiente. Para las pendientes cóncavas las pérdidas son mayores cerca de la cima de la pendiente pero disminuye a lo largo de la porción inferior hasta el extremo en que pueda presentarse la depositación (SEMARNAT-UACH, 2002)

2.3.4. Cubierta del suelo

La cobertura vegetal juega un papel muy importante en la intercepción de las gotas de lluvia, evitando que la energía cinética de las mismas se disipe en el suelo. La eficiencia de la cobertura de plantas para reducir la erosión depende de la altura y continuidad de la cubierta vegetal aérea, de la densidad de la cobertura en el suelo y de la densidad de raíces. La altura de la cubierta aérea es importante ya que gotas que caigan de más de 7 m de altura pueden obtener casi 90% de su velocidad terminal. Este efecto es muy importante en el caso en que las gotas interceptadas por el follaje puedan formar gotas más grandes y por consecuencia más erosivas (Figueroa *et al.*, 1991).

Es indiscutible los beneficios de la cobertura vegetal en la erosión de suelos: como disipador de la energía, obstáculo en la escorrentía, y precursor de la conservación del agua en el suelo y subsuelo (SEMARNAT, 2008).

Son varios los procesos que se llevan a cabo en presencia de vegetación:

- a) Las gotas de lluvia se rompen antes de alcanzar el suelo.
- b) Se reduce la velocidad final de las gotas de lluvia.
- c) Aumenta la duración de la precipitación.
- d) Se presenta combinación de gotas pequeñas en gotas más grandes que caen a menor velocidad.
- e) Se divide la precipitación en lluvia directa y la que escurre lentamente por troncos y tallos.

2.3.5. Tipo de suelo

El tipo de suelo es muy importante ya que dependiendo de las características de este se podrían proponer las obras de conservación y restauración de suelos

además de conocer sus características ante la susceptibilidad a la erosión. Entre sus propiedades físicas se encuentra (CONAFOR, 2014); la textura que es la proporción de arena, limo y arcilla, esto es muy importante ya que de esta característica depende por ejemplo su capacidad de retener humedad y su contenido nutrimental, además de la característica de la textura del suelo se puede deducir que tan estable o inestable es, generalmente texturas medias son más susceptibles de erosionar.

La estructura del suelo nos proporciona información sobre la infiltración del agua, el drenaje, la aireación y el desarrollo de raíces (Aguilera *et al.*, 1996). Otras características importantes son; el color del suelo, su porosidad, consistencia, profundidad y la densidad aparente que nos brinda información valiosa de las características generales del suelo.

2.3.6. Manejo del suelo

Las tasas de erosión incrementan por las actividades humanas, está visto que los grandes problemas de erosión están ligados al manejo inadecuado del suelo. Por ejemplo el hecho de practicar agricultura o ganadería en terrenos no aptos para dichas actividades, propician y aumentan las probabilidades de ocurrencia de la erosión. En primer lugar porque se retira la vegetación natural que sirve de amortiguador al impacto de las gotas de lluvia. Además porque la preparación del terreno involucra la destrucción de los agregados que se encuentran en la superficie; se modifica el porcentaje de cobertura aérea y de mantillo; o más grave aún, se construyen surcos en el sentido de la pendiente que propicia el aumento de suelo perdido (SEMARNAT-UACH, 2002).

2.3.7. Factores clave que determinan la erosión hídrica del suelo

Después de las revisiones realizadas sobre los factores que influyen sobre la erosión hídrica del suelo se seleccionaron las siguientes:

Información general: Relieve, material parental, clima, vegetación y uso del suelo.

Variables forestales: Cobertura arbórea (Dosel), cobertura herbácea, cobertura del piso forestal (Hojarasca y mantillo), biomasa del piso forestal y el área basal.

Variables edáficas: Contenido de materia orgánica, textura, densidad aparente, estabilidad de agregados, pH, compactación del suelo, profundidad y datos de infiltración.

Estos serán determinados en campo para su integración y análisis y posteriormente hacer las recomendaciones para trabajos similares a este.

2.4. Metodologías utilizadas para la medición de la erosión hídrica del suelo

Debido a la importancia y la severidad del problema de erosión a nivel mundial, se han propuesto diferentes metodologías para cuantificarlo, para esto se han desarrollado varios métodos para evaluar la pérdida de suelo estos se clasifican en cuantitativos y cualitativos. Los métodos cualitativos se basan en la observación de las manifestaciones de la erosión de suelos directamente en el sitio de estudio o apoyados en material cartográfico de percepción remota. Por el otro lado los métodos cuantitativos permiten la estimación numérica de la erosión mediante rangos cuantitativos con lo que se pueden establecer diferentes grados erosivos esta forma de evaluar la erosión del suelo puede ser medido directamente en campo mediante los siguientes métodos:

- Agujas de erosión.
- Perfiles microtopográficos.
- Estaciones de aforo y colectores.
- Lotes de escurrimiento.
- Simuladores de lluvia.
- Técnica del Cesio 137.
- Redistribución del Carbono orgánico.

Mientras que la forma de evaluar indirectamente se realiza mediante modelos de evaluación aplicados al manejo de los recursos naturales que permiten la simulación de escenarios y predicción de los fenómenos físicos. Estos se dividen en modelos estadísticos, modelos físicos y modelos paramétricos en el que destaca la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) y sus modificaciones por su mayor aceptación y más amplia aplicación, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS). Otros modelos paramétricos se han desarrollado cada uno de ellos ocupando diferentes factores para calcular la erosión (SEMARNAT-UACH, 2002).

Se han expuesto múltiples métodos con diferentes formas de recabar la información sobre la erosión del suelo, puesto que algunos de estos se aplican a ciertas condiciones y en sitios específicos tal como los métodos directos esta información podría no ser comparada con datos de sitios diferentes y con otros método de esta naturaleza es por eso que en esta ocasión se utilizará como base un método resultado del marco de protocolo para el monitoreo de la degradación de tierras y desertificación en México donde se plantean cuatro metodologías para el levantamiento de información con respecto a la erosión del suelo expuestos en el informe “Mejora de la información para promover el manejo forestal para la protección del suelo y del agua” (CONAFOR, 2015) con el motivo de la preparación del Global Forest Resources Assessment (FRA) en 2015. Cada una de las metodologías propuestas fueron probadas en campo para su validación. Finalmente en el taller internacional “Manejo de la información para promover la protección del suelo y el agua en la vegetación forestal” realizado del 14 al 17 de octubre de 2014 en las instalaciones de la CONAFOR, se retomaron

los elementos que presentaron las mejores estrategias de los cuatro métodos descritos y probados en campo respecto a la evaluación de los parámetros establecidos teniendo como resultado un método híbrido descrito en la **“Guía de campo para una evaluación rápida de las funciones protectoras del bosque del suelo y el agua”** (FAO, 2015) que conjunta esos elementos fundamentales que nos podría aportar datos confiables sobre la erosión. En este estudio se retomó el método híbrido resultante de estos trabajos con nuevos aportes en el levantamiento de nuevas variables que se proponen en el capítulo 2.3.7 los cuales se consideran pertinentes para explicar la erosión en las áreas forestales bajo estudio.

2.5. Referencias

- Aguilera C. M., Martínez E. R. (1996). Relaciones Agua, Suelo, Planta Atmósfera. Universidad Autónoma Chapingo.
- Adema, E. O., Babinec, F. J., & Peinemann, N. (2001). Perdida De Nutrientes Por Erosion Hídrica En Dos Suelos Del Caldenal Pampeano. *Ciencia Del Suelo*, 19(2), 144–154.
- Agratronix. (n.d.). SOIL COMPACTION INSTRUCTIONS. USA.
- Alvarado, M., Colmenero, J. A., & Valderrábano, M. de la L. (2007). La erosión hídrica del suelo en un contexto ambiental, en el estado de Tlaxcala, México. *Ciencia Ergo Sum*, 14(3), 317–326.
- Alvarado C., Miguel; Colmenero R., Aurelio; Valderrábano A., M. de la L. (2007). La erosión hídrica del suelo en un contexto ambiental, en el estado de Tlaxcala, México. *Ciencia Ergo Sum*, 14, 317–326.
- Cerdá, A. (2011). La erosión del suelo y sus tasas en España. *Ecosistemas*, (3).
- CIMMYT. (2013). *Estabilidad de los agregados del suelo tamizando en húmedo, guía útil para comparar las prácticas de manejo de cultivo*. México.
- CONAFOR. (2014). *Protección, restauración y conservación de suelos forestales, manual de obras y prácticas*. (Primera re).
- CONAFOR. (2015). Mejora de la información para promover el manejo forestal para la protección del suelo y del agua, informe final de México. Proyecto FAO-CONAFOR. Zapopan, Jalisco, México.
- CONAFOR-UACH. (2013). *Línea base nacional de degradación de tierras y desertificación* (Informe fi). Zapopan, Jalisco.
- CORNARE, 1995. (1995). Agentes Que Intervienen En La Erosion (pp. 1–39). Retrieved from [http://www.unalmed.edu.co/~poboyca/documentos/documentos1/documentos-Juan Diego/Plnaifi_Cuencas_Pregado/cap 1 y 2 libro erosion.pdf](http://www.unalmed.edu.co/~poboyca/documentos/documentos1/documentos-Juan%20Diego/Plnaifi_Cuencas_Pregado/cap%201%20y%202%20libro%20erosion.pdf)
- Correa, C. P. C., & Aliaga, C. (2010). Evaluación de la pérdida de suelo, asociada al proceso de expansión urbana y reconversión productiva. Caso: Comunas de Los Andes, Quillota y Concón, valle del Aconcagua. *Revista de Geografía Norte Grande*, 49(45), 41–49. <http://doi.org/10.4067/S0718-34022010000100003>
- De Regoyos, M. (2003). *Metodología para la evaluación de la erosión hídrica con modelos informáticos. Aplicación del modelo GEOWEPP a dos pequeñas cuencas de Madrid*. Universidad Politécnica de Madrid.

Durán, V.H., Rodríguez, C.R., Cuadros, S., Francia, J. R. (2014). Impacto de la erosión y escorrentía en laderas de agroecosistemas de montaña mediterránea. *Ecosistemas: Revista Científica Y Técnica de Ecología Y Medio Ambiente*, 23(1), 66–72.

FAO. (2015). *Guía de campo para una evaluación rápida de las funciones protectoras del bosque del suelo y el agua; un método científico sólido, rentable y fácil de aplicar para recopilar datos a fin de promover el manejo forestal para la protección del suelo y el agua*. Roma, Italia.

Figuerola, Benjamin; Amante, Alejandro; Cortes, H. Gregorio; Pimentel, José; Osuna, E. Salvador; Rodríguez, J. Matilde; Morales, F. J. (1991). *Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión*. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.

Huerta, J. de J. (2007). *Efecto de la cobertura vegetal y raíces en la erosión del suelo*. Colegio de postgraduados.

Imeson, A., & Curts, M. (2004). La Erosión del Suelo. *Lucinda*, (1), 15.

Iniestra, D. J. M., & Ramírez, M. F. (2013). Relación entre la cobertura del terreno y la degradación física y biológica de un suelo aluvial en una región semiárida. *Terra Latinoamericana*, 200–210.

López, Hugo E.; De la Mora, Celia; Ruíz, José A.; Chávez, Á. A. (2013). Efecto de la cobertura de suelo de tres cultivos sobre la erosión hídrica. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*. <http://doi.org/10.5154/r.rchsa.2012.06.015>

Loredo Ostí, C., Beltrán Lopez, S., Moreno Sánchez, F., & Casiano Domínguez, M. (2007). *Riesgo de la erosión hídrica y proyección de acciones de manejo y conservación del suelo en 32 microcuencas de San Luis Potosí*.

Miura, Satoru; Ugawa, Shin; Yoshinaga, Shuichiro; Yamada, Tsuyoshi; Hirai, K. (2015). Floor Cover Percentage Determines Splash Erosion in Chamaecyparis obtusa Forests. *Forest, Range & Wildland Soils*, (May). <http://doi.org/10.2136/sssaj2015.05.0171>

Moreno, M. P., Luis, J., Prieto, P., & Castellón, A. E. E. (2003). Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica A comparison of methods in estimating soil water erosion, *Investigac*(821), 23–36.

Muñoz G., Rogelio; Ventura R., Eusebio; Gonzalo S., Enrique; Dominguez C., Miguel; Luna Z., Filiberto; Oropeza M., J. L. (2006). *Erosión hídrica en la microcuenca San Pedro Huimilpan: valoración integrada para su control*. Universidad Autónoma de Querétaro.

Oldemann, L. R. (1988). Guidelines for General Assessment of the Status of Human-Induced Soil Degradation. Global Assessment of Soil Degradation (GLASOD). *International Soil Reference and Information Centre*. Retrieved from http://www.isric.org/sites/all/modules/pubdlcnt/pubdlcnt.php?file=/isric/webdocs/docs/ISRIC_Report_1988_04.pdf&nid=332

Ortiz S., Ma. de la L., M. A. y J. W. E. B. (1994). *Evaluación, cartografía y políticas*

preventivas de la degradación de la tierra. (Universidad Autónoma Chapingo- Comisión Nacional de Zonas Áridas- Colegio de Postgraduados, Ed.). Chapingo, México.

Osman, K. T. (2014). *Soil Degradation , Conservation and Remediation.* <http://doi.org/10.1007/978-94-007-7590-9>

PASOLAC. (2005). *Manual de Métodos Sencillos para estimar Erosión Hídrica.* 1. (B. A. J. Somarriba Chang Matilde, Obando Miguel, Ed.). Managua, Nicaragua.

Pérez Nieto, Joel; Valdés Velarde, Eduardo; Ordaz Chaparro, V. M. (2012). Cobertura Vegetal Y Erosión Del Suelo En Sistemas Agroforestales De Café Bajo Sombra. *Terra Latinoamericana*, 30(3), 249–259.

Prego, A. J. (1962). La érosion eolica en la republica argentina. *Ciencia E Investigación.*

SEMARNAT. (2012). *Informe de la situación del medio ambiente en Mexico.*

SEMARNAT-C.P. (2003). *Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1:250 000. Memoria nacional 2001-2002.* México.

SEMARNAT-UACH. (2002). *Evaluación de la pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica en la República Mexicana, esc. 1:1 000 000.*

Serrato, B., Díaz, R., Bermúdez, L., & Laguna, H. (1999). Óptimo de cobertura vegetal en relación a las pérdidas de suelo por erosión hídrica y las pérdidas de lluvia por intercepción. *Papeles de Geografía*, 5–16.

Torres Benites, E., Cortes Becerra, J., Mejía Sáenz, E., Exebio García, A., Santos Hernández, A. L., & Piñón Delgadillo Eugenia, M. (2003). Evaluación de la degradación de los suelos en la cuenca “El Josefino”, Jesús María, Jalisco. *Terra Latinoamericana*, 21, 116–126.

USDA. (2000). Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo, 88.

Vásquez-méndez, R., Ventura-ramos, E., Oleschko, K., Hernández-sandoval, L., Parrot, J., & Nearing, M. A. (2010). Soil erosion and runoff in different vegetation patches from semiarid Central Mexico. *Catena*, 80(3), 162–169. <http://doi.org/10.1016/j.catena.2009.11.003>

Topp G. C., W. D. Reynolds, F. J. Cook, J. M. Kirby, M. R. Carter. (1997). Physical attributes of soil quality. pp. 21-58. In: E. G. Gregorich and M. R. Carter (eds.). Soil quality for crop production and ecosystem health. Developments in Soil Science Vol. 25. Elsevier Science. New York, NY, USA. UN-CCD

Wilcox, BP. (1994). Runoff and erosion in intercanopy zones of pinyon-puniper woodlands. *J. Range Manage.* 47: 285-295.

3. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA EROSION HÍDRICA DEL SUELO EN DOS ECOSISTEMAS FORESTALES

RESUMEN

Los ecosistemas forestales retoman un papel muy importante en la aportación de bienes y servicios a la sociedad; sin embargo, pueden estar afectados por algún tipo de degradación. Este estudio se realizó en un Bosque Templado (Zoquiapan, México) y en una Selva Baja Caducifolia (Ajuchitlan, Morelos) donde se midieron y analizaron variables seleccionadas de distintos trabajos realizados sobre erosión hídrica, con el objetivo de determinar aquellas que expliquen la erosión en los sitios evaluados para tomarlos en cuenta en monitoreos futuros. Los resultados obtenidos revelaron que en el primer sitio, la pendiente ($R^2 = .34$ y p-valor = .0976), el porcentaje de roca ($R^2 = .33$ y p-valor = .1080) en el piso forestal y la densidad aparente ($R^2 = .42$ y p-valor = .0573) tuvieron correlación positiva con la variable respuesta, mientras que resultaron con una correlación negativa las variables profundidad del suelo ($R^2 = .23$ y p-valor = .1926) y el porcentaje de materia orgánica ($R^2 = .20$ y p-valor = .2248); con el Análisis de Componentes Principales (ACP) resultaron también importantes las variables de porcentaje de suelo desnudo, compactación, e infiltración, las primeras dos con correlación positiva y la infiltración con correlación negativa. Para la vegetación de Selva Baja Caducifolia resultaron importantes en el primer análisis, con una correlación positiva, las variables: pendiente del terreno ($R^2 = .70$ y p-valor = .0049), porcentaje de suelo expuesto ($R^2 = .38$ y p-valor = .0748), porcentaje de roca ($R^2 = .34$ y p-valor = .0998) y densidad aparente ($R^2 = .32$ y p-valor = .1109) y con correlación negativa las variables: vegetación ($R^2 = .52$ y p-valor = .0291) y su biomasa ($R^2 = .52$ y p-valor = .0277). Al realizar el ACP se encontró que la profundidad del suelo también es importante. Las variables evaluadas que tuvieron mejor correlación con la variable respuesta deben ser consideradas para facilitar monitoreos futuros.

Palabras clave: Ecosistemas forestales, variables, erosión hídrica, monitoreo.

Tesis de maestría en ciencias en ciencias forestales, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Moisés Matías Ramos

Director de tesis: Dr. Jesús David Gómez Díaz

ABSTRACT

Forest ecosystems fulfill a very important role as contributors of goods and services to society; however, they may be affected by some types of degradation. The present work was carried out in a temperate forest (Zoquiapan, State of Mexico) and in a low deciduous rain forest (Ajuchitlan, State of Morelos), where variables drawn from various works on hydric erosion were measured and analyzed in order to determine those explaining erosion on the studied sites and thus take them into account in future monitoring tasks. Results indicate that, on the first site, slope ($R^2 = .34$ and $p\text{-value} = .0976$), percentage of rock ($R^2 = .33$ and $p\text{-value} = .1080$) on the forest floor, and apparent density ($R^2 = .42$ and $p\text{-value} = .0573$) had a positive correlation with the response variable, while variables showing a negative correlation were soil depth ($R^2 = .23$ and $p\text{-value} = .1926$) and percentage of organic matter ($R^2 = .20$ and $p\text{-value} = .2248$); variables resulting also important with the Main Component Analysis (ACP) were: percentage of uncovered soil, compacting, and infiltration, the former two showing a positive correlation and infiltration showing a negative one. In the low deciduous forest site, in the first analysis, the variables that resulted important, with a positive correlation, were: slope ($R^2 = .70$ and $p\text{-value} = .0049$), percentage of uncovered soil ($R^2 = .38$ and $p\text{-value} = .0748$), percentage of rock ($R^2 = .34$ and $p\text{-value} = .0998$), and apparent density ($R^2 = .32$ and $p\text{-value} = .1109$), while those with a negative correlation were vegetation ($R^2 = .52$ and $p\text{-value} = .0291$), and its biomass ($R^2 = .52$ and $p\text{-value} = .0277$). With the ACP analysis, soil depth was found as also important. Those variables showing the highest correlations with the response variable must be considered in order to enhance future monitoring works.

Key words: Forest ecosystems, variables, hydric erosion, monitoring.

3.1. INTRODUCCIÓN

La degradación es un problema que afecta el recurso suelo en alguno de sus cuatro modalidades; erosión hídrica, erosión eólica, degradación química y degradación física por lo que las áreas forestales no están exentas en tener algún tipo de factor degradante principalmente por la erosión hídrica. En el trabajo realizado por la CONAFOR-UACH (2013) se deduce que el 67.74% del país presenta erosión (en diferentes grados) de donde la erosión hídrica se presenta en 20% del territorio, la eólica con el 34.94%, la degradación química con el 8.1% y con menor superficie la física con 4.7%. Tal como lo describen estos datos, la degradación es un problema grave que ocupa gran parte del territorio nacional mexicano, a pesar de esta problemática, cada vez más, estamos conscientes de los bienes y servicios que obtenemos de nuestros recursos naturales en este caso de las funciones protectoras de las áreas forestales sobre el recurso suelo y el agua, por ende, es necesario evaluar cómo se manifiesta este tipo de función de protección en las zonas forestales, siguiendo esta temática, se han realizado varios esfuerzos en determinar aquellos factores que influyen en la erosión del suelo de los que se deriva un amplio listado de variables importantes tales como el relieve del cual depende la velocidad que puede alcanzar el escurrimiento superficial del agua así como otras particularidades tal como lo describen Figueroa *et al.* (1991) y SEMARNAT-UACH (2002). El tipo de material parental presente en los sitios influye directamente en las características del suelo, este material parental también influye en la tasa de formación de suelo el cual debe estar en equilibrio con la tasa de erosión para poder mantener la capacidad de productividad del suelo (Loredo *et al.*, 2007). Las condiciones climáticas son las fuerzas propulsoras de la erosión del suelo, en donde se clasifica a la precipitación como el principal agente erodante del suelo (Figueroa *et al.*, 1991). Los datos del tipo de vegetación y sus condiciones son indispensables para

manejar el bosque con la finalidad de lograr funciones protectoras (Figueroa *et al.*, 1991; Miura *et al.*, 2015). Un factor condicionante de la susceptibilidad de un suelo a la erosión es el uso que se le da (Correa & Aliaga, 2010; Durán *et al.*, 2014; Iniestra & Ramírez, 2013) además de algunas propiedades físicas y químicas del suelo por su importancia en su susceptibilidad a la erosión (Cabria *et al.*, 2002; Huerta, 2007; Shepherd *et al.*, 2001; Torres *et al.*, 2003) Los caracteres mencionados son algunos ejemplos de resultados que se han obtenido de trabajos realizados sobre la erosión del suelo más sin embargo se siguen realizando esfuerzos con la finalidad de llegar a entender bien este fenómeno. El problema ha llegado a ser tan grave que instancias a nivel mundial han estado trabajando en establecer algún tipo de monitoreo que se pueda adaptar a los diferentes tipos de vegetación existentes en todo el mundo, uno de los esfuerzos en implementar un método de monitoreo es la realizada por la Agencia Forestal Japonesa en conjunto con la FAO-CONAFOR-UACH en el año 2015 en el cual evaluaron cuatro métodos de monitoreo de las funciones protectoras de la vegetación sobre el recurso suelo teniendo como resultado un método híbrido descrito en la “Guía de campo para una evaluación rápida de la funciones protectoras del bosque del suelo y el agua” (FAO, 2015).

En esta investigación se tomó como base el método resultante descrito en la guía de la FAO (2015) con sus modificaciones pertinentes para la integración de las nuevas variables que se consideran de vital importancia en este tipo de monitoreo. Dada la importancia del problema y la necesidad de monitorearlo se planteó el objetivo de determinar que variables influyen sobre la erosión del suelo en dos áreas con vegetación diferente, la primera en un Bosque Templado y la segunda en una Selva Baja Caducifolia para determinar aquellas variables que están fuertemente correlacionadas con la erosión y tomarlas en consideración para monitoreos futuros.

3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1. Descripción de los sitios de estudio

El primer sitio evaluado fue un Bosque templado que se encuentra inmerso en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl-Zoquiapan específicamente en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ) que se encuentra entre las siguientes coordenadas geográficas: 19° 12' 30'' y 19° 20' 00' de latitud norte y 98° 42' 30'' y 98° 30' 00' de longitud oeste (Zavala, 1984). Fisiográficamente el área pertenece a la región de la provincia Lagos y Volcanes de Anáhuac, en la subprovincia Gran Sierra Volcánica (INEGI, 1981). La geología de la región corresponde al tipo ígneo andesítico (Zavala, 1984). De acuerdo con los estudios realizados por Rey (1975), los suelos presentes en el área de estudio se clasifican como andosoles mólicos, el clima del lugar se clasifica como Cb'(w2)(w)igw'', y con base en el estudio realizado por Zavala (1984), existen seis asociaciones vegetales; Bosque de Oyamel, Bosque de pino, Bosque de Aile, Asociación de Pino-Aile y áreas de pastizales.

El segundo sitio estudiado corresponde a una vegetación de Selva Baja Caducifolia que se encuentra en el ejido de Ajuchitlán localizado al sureste de la cabecera municipal de Tlaquiltenango, en el estado de Morelos entre las siguientes coordenadas geográficas: 18°27'48.00"N y 98°57'43.00"O (INEGI, 2009). Fisiográficamente el ejido se localiza en la provincia del Eje neovolcánico y la Sierra Madre del Sur, está asentado sobre un substrato geológico que consiste en una plataforma de roca caliza marina del mesozoico, el tipo de suelo presente es el Leptosol (INEGI, 2009). El clima es Aw0'(W)(i')g de acuerdo a Rzedowski (2006), con la fórmula climática de Koppen y las modificaciones de

García (1987), la vegetación presente en el ejido de Ajuchitlán corresponde al de Selva Baja Caducifolia “SBC” (Miranda y Hernández, 1963).

3.2.2. Selección de puntos de muestreo

Se realizó una caracterización previa de los sitios de muestreo siguiendo la metodología propuesta por Gómez (2008) en donde se generaron mapas de fisiografía, clima, uso de suelo y vegetación con ayuda del Sistema de Información Geográfica, que sirvió para conocer el sitio de estudio e identificar los puntos de muestreo. En el caso de Ajuchitlán se retomó la caracterización realizada por Ruiz en el año 2015. En los mapas que se presentan a continuación se observan las unidades biofísicas para Zoquiapan (Figura 2) y Ajuchitlán (Figura 3).

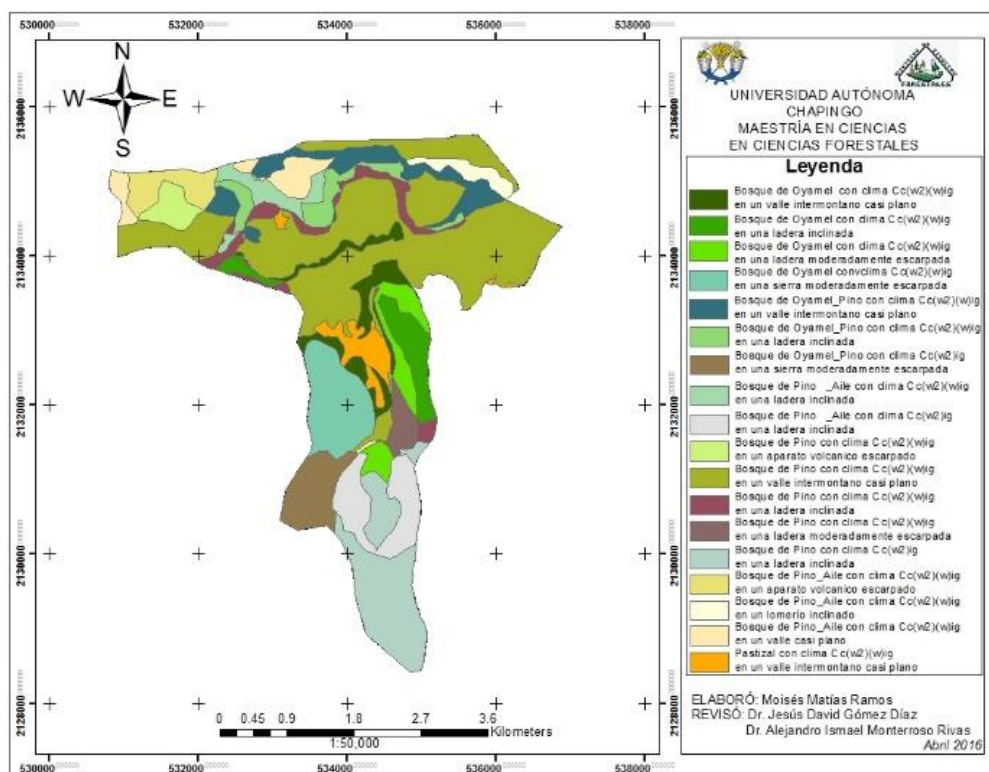


Figura 2. Unidades biofísicas de Zoquiapan, México.

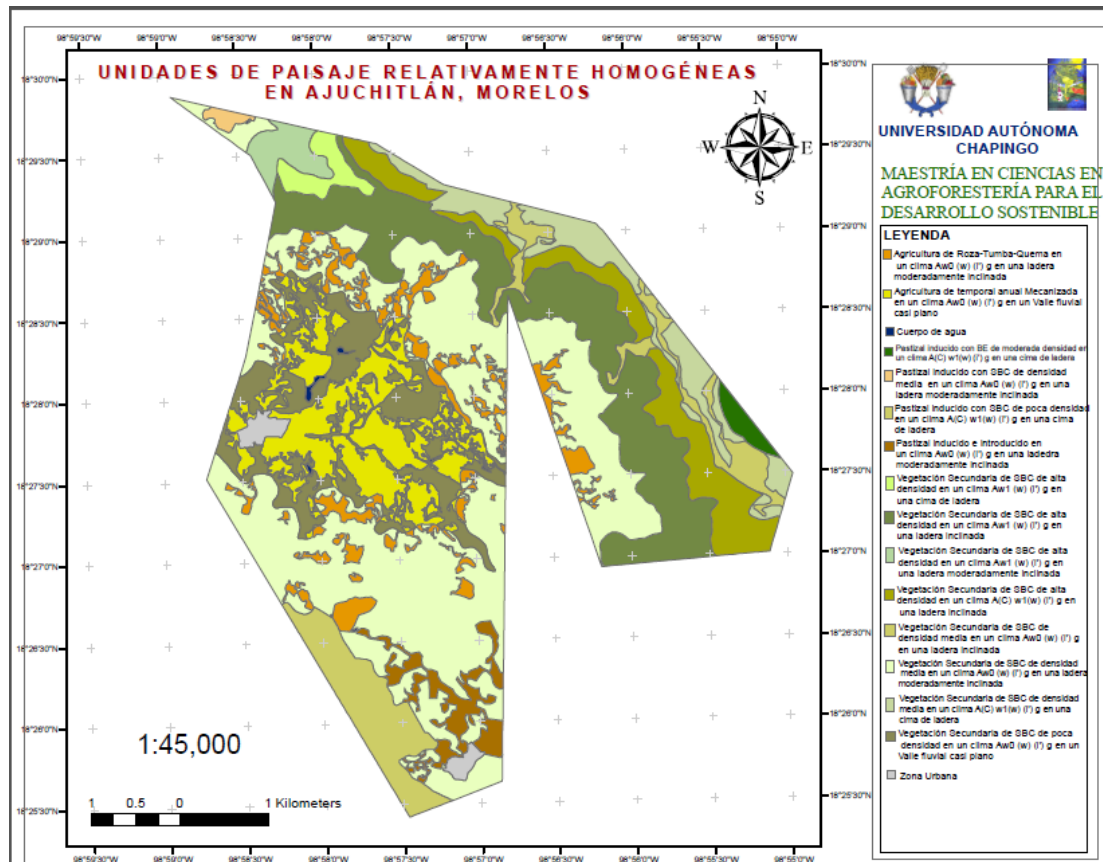


Figura 3. Unidades biofísicas de Ajuchitlán, Morelos. Fuente: Ruiz, 2015.

Los puntos de muestreo fueron establecidos sobre tres unidades biofísicas que fueron seleccionadas por su importancia y para fines de esta investigación, teniendo así los siguientes cuadros donde se señalan las unidades seleccionadas, su clave de identificación y las coordenadas de cada uno de los tres puntos de muestreo para Zoquiapan (Cuadro 1) y para Ajuchitlán (Cuadro 2), cabe mencionar que en cada unidad biofísica se realizaron tres repeticiones.

Cuadro 1. Puntos de muestreo para Zoquiapan, México.

Bosque templado (Zoquiapan, México)			
Unidad biofísica	Clave de identificación	Repetición	Coordenadas
Bosque de Oyamel con un clima Cc(w2)(w)ig en una ladera inclinada	BO_LI	1	534494-E 2133356-N
		2	534675-E 2132688-N
		3	534906-E 2131999-N
	BP_VI	1	533898-E 2133370-N
		2	534394-E 2134038-N
		3	535210-E 2134024-N
Bosque de Pino_Aile con un clima Cc(w2)ig en una ladera inclinada	BPAi_LI	1	534274-E 2130682-N
		2	534557-E 2130007-N
		3	534748-E 2131102-N

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 2. Puntos de muestreo para Ajuchitlán, Morelos.

Selva Baja Caducifolia (Ajuchitlán, Morelos)			
Unidad biofísica	Clave de identificación	Repetición	Coordenadas
Vegetación secundaria de S.B.C de alta densidad en un clima Aw1(w)(l')g en una ladera inclinada	VS.SBC.AD_LI	1	503387-E 2041757-N
		2	503444-E 2043863-N
		3	503632-E 2043800-N
Vegetación secundaria de S.B.C. de poca densidad en un clima Aw0(w)(1')g en un valle fluvial casi plano	VS.SBC.PD_VF	1	503964-E 2042527-N
		2	503794-E 2042213-N
		3	503387-E 2041757-N
Vegetación secundaria de S.B.C. de densidad media en un clima Aw0(w)(1')g en una ladera moderadamente inclinada	VS.SBC.DM_LMI	1	503584-E 2039910-N
		2	503584-E 2039910-N
		3	504326-E 2039765-N

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3. Parcela de muestreo

Se utilizó como base la parcela de muestreo denominada “submuestreo por transecto y línea de puntos” descrita en la guía de campo emitida por la FAO (2015) incluyendo las modificaciones para el levantamiento de todas las variables seleccionadas (ver detalles en la f Figura 4), que consiste en delimitar un área de 20 X 20 m sobre el cual se trazaron dos líneas ortogonales, la primera en dirección de la pendiente y la segunda transversal a esta, sobre estos se levantaron los datos de cobertura del dosel con un densitómetro grs y la toma de fotografías de cuadros de 1 m² en cada extremo de las dos líneas para determinar el porcentaje de cobertura del piso forestal. Además de los datos de cobertura, se cuantifico el espesor de la cubierta y el tipo de material presente, es así que en el cuadro posicionado en el extremo superior de la línea que va en la dirección de la pendiente se levantaron los datos de biomasa de cada material (vegetación, hojarasca y mantillo) así como los datos de profundidad del espesor. Se determinó también el área basal midiendo el diámetro de los árboles presentes en el cuadrante IV de la parcela que posteriormente fue extrapolado a la hectárea. En el cuadrante II se realizaron los levantamientos de los datos edáficos. Las observaciones y mediciones de los pedestales se hicieron en el cuadrante III. La identificación y medición de las cárcavas y los canalillos se realizó en toda la parcela de muestreo, esto se llevó a cabo con la finalidad de determinar el volumen del suelo perdido. En la Figura 4 vienen señaladas con una letra mayúscula los puntos de medición de las variables para identificar su registro en el formato de campo (Apéndice 6.2).

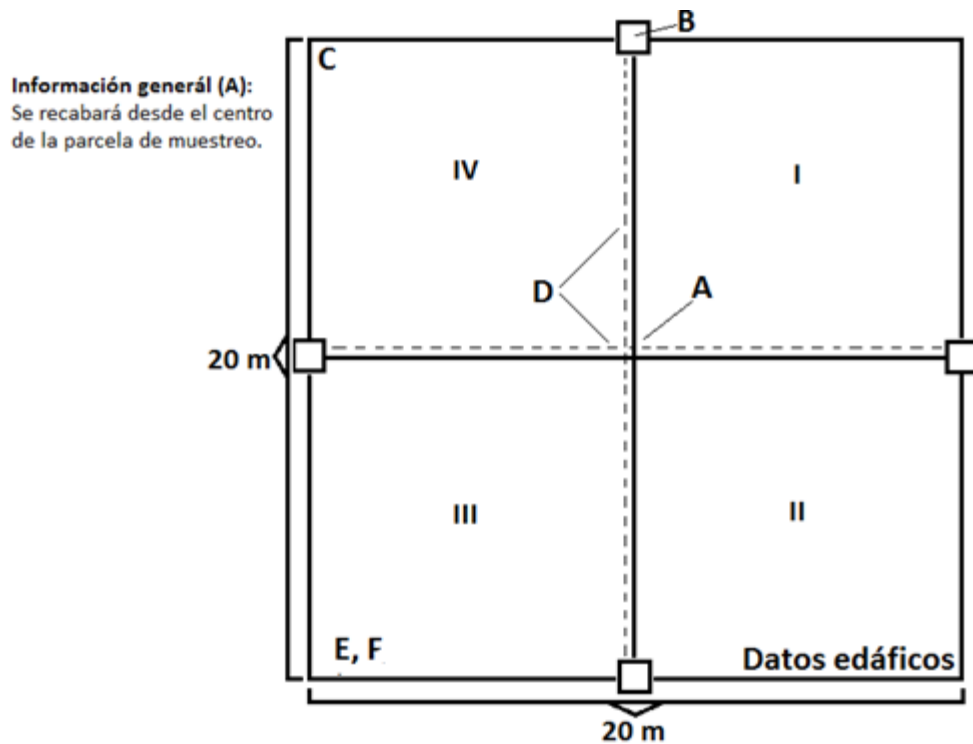


Figura 4. Parcela de muestreo.

3.2.4. Levantamiento y procesamiento de datos

3.2.4.1. Información general del sitio de estudio

Previo al levantamiento en sí del muestreo fue necesario obtener información general de cada punto de muestreo recolectando los datos de relieve, material parental, clima, vegetación y uso del suelo, éste último suponiendo que al área forestal recibe otro tipo de manejo como pastoreo aprovechamiento forestal, etc. esto para analizar la función del bosque con respecto a la protección del suelo.

3.2.4.2. Cobertura forestal

Cobertura arbórea

La cobertura arbórea podría tomar un papel importante en la erosión del suelo (Pérez *et al.*, 2012). Para obtener esta variable en campo, se utilizó un Densitómetro GRS en donde se obtuvieron datos de la cubierta del dosel forestal (parte aérea) tal como se describe en el apartado del método IV del informe de CONAFOR (2015), los pasos que se siguieron para su levantamiento son los siguientes:

1. Dirigirse a un extremo de las líneas marcadas.
2. Ajustar el densitómetro a una posición horizontal (cerciorarse que las burbujas de nivel estén centradas).
3. Caminar sobre cada uno de los transectos tomando los datos de cobertura aérea (se tomaron 30 observaciones por cada línea resultando 60 datos por cada parcela de muestreo).
4. Un integrante del equipo se dedicó únicamente a registrar los datos en el formato de campo (Apéndice 6.2, Apartado D).

Para este procedimiento se requirieron de 3 personas y dos densitómetros con los cuales el levantamiento se hizo eficiente, así que dos de los integrantes se dirigieron a los extremos de las líneas establecidas y tomaron los datos mientras que la tercera persona se dedicó únicamente a registrar los datos.

Cobertura del piso forestal

Se determinó el porcentaje de la cobertura a nivel superficial en cada punto de muestreo ya que es importante en la protección del suelo ante la erosión hídrica (Pérez *et al.*, 2012) para su levantamiento se tomaron fotografías de forma perpendicular al terreno de 4 cuadros de 1 m², las fotos fueron registradas para detectar el punto al que pertenecen y en gabinete se procedió a su análisis con

el software libre SamplePoint de donde se determinó el porcentaje de la cobertura herbácea, residuos (árboles caídos, hojarasca y materiales descompuestos), además de las rocas y piedras presentes así como la determinación del suelo expuesto (CONAFOR, 2015; FAO, 2015).

Biomasa del piso forestal

La biomasa del piso forestal fue medida en el cuadro de 1 m² localizado en la parte superior de la línea colocada sobre la dirección de la pendiente (ver Figura 4) en este cuadro se midió la biomasa de la vegetación herbácea, el espesor de la hojarasca presente así como la del mantillo y se registraron en el formato de campo (Apéndice 6.2, Apartado B), posteriormente se colectaron submuestras de cada uno de los materiales para su procesamiento en gabinete con los que se obtuvieron datos de la biomasa seca, parte de esta metodología se describe en el informe de CONAFOR (2015).

Área basal

Este dato se obtuvo midiendo los árboles ≥ 5 cm de diámetro a la altura de 1.30 m que se encontraron en el cuadrante IV y se fueron registrando en el formato de campo (Apéndice 6.2, Apartado C), en gabinete se hicieron las operaciones necesarias para determinar el área basal sobre hectárea presente en el sitio.

Variables edáficas

Para obtener la información de algunas propiedades físicas y químicas del suelo por su importancia en su susceptibilidad a la erosión, se levantó una muestra de ½ kg de suelo en el cuadrante II y en laboratorio se determinó su contenido de

materia orgánica (AS-12-1998), textura (AS-08-1998) y pH (AS-09-1998) siguiendo la metodología descrita en la Norma 021 (SEMARNAT, 2000). La estabilidad de agregados se obtuvo mediante la metodología de Yoder (CIMMYT, 2013), la compactación del suelo se determinó con un penetrometro (Agratronix, s/d), para la infiltración fue necesario utilizar un infiltrómetro de anillo (USDA, 2000). La densidad del suelo se determinó mediante el método de excavación directo en campo y la profundidad se midió con una barrena sin fin.

3.2.4.3. Variables de erosión

Pedestales

Se detectó este tipo de erosión mediante la identificación de relictos de suelo superficial que permanece por la protección de piedras, ramas o plantas (Muñoz *et al.*, 2006), este dato otorga cierto conocimiento de la magnitud del suelo perdido con respecto al nivel del suelo original. Una vez identificados estos indicios de erosión se procedió a la medición de la altura del espesor del suelo perdido en un número determinado de puntos de medición en el área de muestreo (III cuadrante).

Canalillos y Cárcavas

Este tipo de erosión se identifica cuando una línea de escurrimiento ha causado la remoción y el arrastre de suelo determinando que aquellas que midan menos de 30 cm de profundidad serán identificadas como canalillos y aquellas con medidas > 30 cm se le denominan cárcavas (Miura, 2000).

Este tipo de erosión fue observado en toda la parcela de muestreo y al identificarlos se procedió a su medición siguiendo los pasos que se enumeran a continuación (CONAFOR, 2014).

1. Se midió el ancho total del canalillo o cárcava.
2. Se dividió el ancho medido en porciones iguales. Entre más irregular era el fondo del cauce se realizó una mayor cantidad de proporciones.
3. Se midió la profundidad de cada una de las distancias parciales.
4. Con los datos obtenidos se calculó el área de la sección.
5. Se repitió el procedimiento en tramos en donde existían cambios significativos en la sección transversal.
6. Por último se obtuvo el promedio del área de las secciones transversales y se multiplicó por la longitud de los tramos, es así como se obtuvo el volumen aproximado de suelo removido.

3.2.5. Análisis estadístico

Ya que el objetivo de este estudio es hacer una indagación para determinar aquellas variables que influyen sobre la erosión del suelo, se realizó en primera instancia una matriz de correlación entre las covariables seleccionadas y la variable respuesta (erosión en forma de pedestales ya que para canalillos y cárcavas únicamente se tuvo un dato) para identificar aquellas que son importantes, se seleccionaron las que tuvieran un valor de correlación arriba del .5 tomando en cuenta que aquellos valores que se acerquen a la unidad son positivamente correlacionadas (conforme aumenta el valor de la covariable, aumenta el valor en la erosión) y aquellos valores que se acerquen al valor de -1 están negativamente correlacionados (conforme aumenta el valor de la covariable, disminuye el valor en la erosión) y los valores que se acercan al cero no están correlacionadas (la covariable no explica la variable respuesta). Posteriormente se realizó un análisis de regresión lineal uno a uno para averiguar la fuerza de correlación entre las covariables seleccionadas anteriormente y la erosión, finalmente se apoyó de un análisis de exploración mediante el Análisis de Componentes Principales (ACP) para incluir la interacción de todas las variables y comprobar si existen otras covariables de importancia. El ACP es una

técnica de reducción de la dimensionalidad de un conjunto grande de datos, con la mínima pérdida de información con respecto a la información contenida en el conjunto de datos completo, se enfocó en la interacción entre variables así que la interpretación de las correlaciones entre estas se da mediante los ángulos de los vectores que lo representan así que ángulos agudos indican correlaciones positivas , ángulos obtusos corresponde a correlaciones negativas y ángulos rectos indican que no hay correlación entre variables.

3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos recabados para Zoquiapan se presentan en los Cuadro 3, Cuadro 4, Cuadro 5 mientras que los datos de Ajuchitlán se muestran en los

Cuadro 6, Cuadro 7, Cuadro 8, donde se observan los datos de las características generales de las parcelas de estudio. Primeramente se clasifica por las unidades biofísicas (se presenta la clave de identificación) y después por las repeticiones hechas en cada unidad con sus respectivos datos.

3.3.1. Bosque templado (Zoquiapan, México)

Cuadro 3. Resultados de datos generales y de cobertura en Zoquiapan, México.

PUNTO DE MUESTREO		DATOS GENERALES								COBERTURA				
CLAVE IDENTIFICACIÓN	Rep.	PENDIENTE (°)	P.M.A (mm)	Biomasa (ton/ha) y espesor (cm)						Cob. Dosel (%) Hoja	Cobertura del suelo (%)			
				Biom. Veg ton ha ⁻¹	Biom. Hoja ton ha ⁻¹	Esp. Hoja (cm)	Biom. Mant ton ha ⁻¹	Esp. Mant (cm)	Área Basal m ² ha ⁻¹		Vegetación	Residuo	Suelo	Roca
BP_VI	1	3	1098	1.706	2.953	1.650	6.228	0.680	24.151	58.33	43.35	53.35	0.00	0.83
	2	1	1098	1.368	7.606	1.700	1.430	1.200	16.101	63.33	42.50	55.00	0.00	0.83
	3	5	1098	0.344	9.304	4.700	8.272	1.950	7.728	35.00	41.68	51.65	0.00	0.00
BO_LI	1	23	1128	2.717	9.505	1.850	11.090	4.380	16.517	76.67	45.00	40.00	1.67	0.83
	2	19	1128	0.462	4.350	1.180	13.629	2.360	53.882	85.00	32.50	58.35	2.50	2.50
	3	20	1128	0.280	6.437	3.030	21.031	3.186	24.921	80.00	33.75	65.00	0.63	0.00
BPAi_LI	1	13	1213	1.337	5.266	4.480	5.398	1.390	72.117	61.67	54.28	35.00	8.58	0.00
	2	7	1213	3.681	6.532	3.840	6.105	1.420	12.949	15.00	79.30	16.43	0.73	0.00

3	10	1213	3.221	6.733	3.930	6.084	1.530	22.386	85.00	35.73	55.70	5.73	0.00
---	----	------	-------	-------	-------	-------	-------	--------	-------	-------	-------	------	------

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 4. Resultado de variables edáficas en Zoquiapan, México.

PUNTO DE MUESTREO		VARIABLES EDÁFICAS						
CLAVE IDENTIFICACIÓN	Rep.	Infiltración (in h ⁻¹)	Compactación (MPa)	Prof. suelo (cm)	pH	Determinaciones M.O. (%)	Agregados (%)	DAP
BP_VI	1	25.00	1.55	120	4.30	13.20	0.86	0.64
	3	41.38	1.03	120	5.47	13.58	0.80	0.64
BO_LI	1	21.43	1.33	120	5.20	10.89	0.85	0.72
	2	24.90	1.68	75	4.85	12.90	0.77	0.73
	3	49.59	1.61	90	5.60	13.04	0.72	0.56
BPAi_LI	1	46.15	1.36	120	5.13	13.58	0.73	0.62
	2	8.72	1.59	45	5.90	11.83	0.52	0.59
	3	4.05	1.91	90	5.57	13.44	0.78	0.71

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 5. Resultado de las variables de erosión medidas en Zoquiapan, México.

VARIABLES DE EROSIÓN				
CLAVE IDENTIFICACIÓN	REPETICION	Pedestales (cm)	Canalillos (Vol.)	Cárcavas (Vol.)
BP_VI	1	0	0	0
	2	0	0	0
	3	0	0	0
BO_LI	1	1.28	0	0
	2	1.90	0	0
	3	0	0	0
BPAi_LI	1	0.70	0.11	0
	2	1	0	0
	3	0.86	0	0

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Selva Baja Caducifolia (Ajuchitlán, Morelos)

Cuadro 6. Resultados de datos generales y de cobertura en Ajuchitlán, Morelos.

PUNTO DE MUESTREO		DATOS GENERALES							COBERTURA					
CLAVE IDENTIFICACIÓN	Rep.	PENDIENTE (°)	P.M.A (mm)	Biomasa (ton/ha) y espesor (cm)					Área Basal m ² ha ⁻¹	Cob. dosel (%)	Cobertura del suelo (%)			
				Biom. Veg ton ha ⁻¹	Biom. Hoja ton ha ⁻¹	Esp. Hoja (cm)	Biom. Mant ton ha ⁻¹	Esp. Mant (cm)			Vegetación	Residuo	Suelo	Roca
VS.SBC.PD_VF	1	6	1098	2.15	0.86	2.25	1.07	0.57	53.43	93.333	80.63	5.00	7.50	5.63
	2	12	1098	2.04	1.00	1.47	1.31	0.71	16.25	81.667	83.13	1.25	5.63	4.38
	3	18	1098	1.19	0.64	2.15	0.64	0.56	9.80	26.667	68.75	5.63	6.25	11.88
VS.SBC.AD_LI	1	26	1128	0.30	1.93	2.10	0.00	0.00	17.76	98.333	38.13	20.63	17.50	21.25
	2	22	1128	1.58	1.85	2.62	1.78	1.32	24.17	96.667	64.38	21.25	3.75	5.00
	3	32	1128	0.16	0.93	1.73	0.37	0.88	46.54	81.667	42.50	24.38	13.75	9.38
VS.SBC.DM_LMI	1	18	1213	0.37	1.40	2.12	1.03	1.16	46.13	85.000	46.25	28.75	8.75	13.13
	2	28	1213	0.22	0.90	1.87	0.00	0.00	40.88	90.000	41.88	21.88	15.63	13.13
	3	12	1213	0.67	0.00	0.00	0.00	0.00	45.87	80.000	43.75	21.88	14.38	14.38

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 7. Resultado de variables edáficas en Ajuchitlán, Morelos.

PUNTO DE MUESTREO		VARIABLES EDÁFICAS						
CLAVE IDENTIFICACIÓN	Rep.	Infiltración in h ⁻¹	Comp.	Prof. Del suelo	pH	M.O. (%)	Estabilidad (%)	DAP
VS.SBC.PD_VF	1	62.50	2.068	15.000	7.3	7.6	0.55	0.93
	2	78.95	2.068	13.333	6.8	7.9	0.70	0.99
	3	52.17	2.275	10.000	6.7	7.5	0.61	1.24
VS.SBC.AD_LI	1	92.31	2.068	17.333	7.8	7.7	0.65	1.22
	2	69.77	2.068	12.333	7.3	5.8	0.76	0.85
	3	257.51	2.068	10.000	7.4	7.3	0.70	1.46
VS.SBC.DM_LMI	1	70.59	2.068	11.667	7.3	7.7	0.40	1.15
	2	327.87	2.068	16.667	7	7.5	0.72	0.59
	3	200.00	2.068	11.667	7.8	7.3	0.63	0.77

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 8. Resultado de las variables de erosión medidas en Ajuchitlán, Morelos.

Variables de erosión				
CLAVE IDENTIFICACIÓN	REPETICIÓN	Pedestales (cm)	Canalillos (Vol.)	Cárcavas (Vol.)
VS.SBC.PD_VF	1	0.625	0	0
	2	0.817	0	0
	3	1.020	0	0
VS.SBC.AD_LI	1	2.200	0	0
	2	1.220	0	0
	3	2.073	0	0
VS.SBC.DM_LMI	1	1.247	0.293	0
	2	1.227	0	0
	3	0.963	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en los Cuadro 5Cuadro 8 los indicios de erosión por pedestales fueron los únicos que básicamente se hicieron presentes en los puntos de muestreo habiendo solamente un dato para la variable de canalillos y datos nulos para la variable de cárcavas para ambos sitios. Es así que podemos clasificar a la erosión presente en los sitios como “ligera” en las cinco clasificaciones propuestas por SEMARNAT-UACH (2002).

Para los siguientes análisis se verá la correlación entre las variables medidas y la erosión del suelo únicamente por pedestales, para poder detectar la influencia de estas variables sobre este tipo de erosión. Se descartarán las variables de erosión por canalillos y cárcavas porque es difícil encontrar o hallar alguna correlación ya que solamente tenemos un solo dato para canalillos o en su caso ninguno para el dato de cárcavas.

Además de que se había hecho una clasificación previa de las parcelas de la cual se obtuvieron las unidades biofísicas con sus respectivas características, también se recabó la información directamente de campo, los cuales se presentan en los cuadros anteriores.

Los datos de altitud, pendiente, exposición del terreno, Precipitación Media Anual (P.M.A.), Temperatura Media Anual (T.M.A.) se tomaron como datos complementarios. Como se describe en la metodología, también fueron recabados de campo datos de uso del suelo determinando que en las áreas forestales estudiadas se realiza manejo de pastoreo extensivo, al igual que compartieron las mismas características en cuanto al tipo de roca presente. Descartando aquellos datos de las variables que son iguales o no muy variables (las descritas previamente) se realizó el análisis estadístico con las variables restantes, ver capítulo de análisis estadístico.

3.3.3. Cobertura forestal

Los resultados de biomasa y área basal se observan en los Cuadro 3

Cuadro 6, se reportan en unidades de toneladas sobre ha (ton ha^{-1}) y el espesor medido para hojarasca y mantillo se presenta en cm de profundidad, estos elementos del suelo son importantes en la mitigación de la erosión del suelo (Durán *et al.*, 2014). Además fue medida el área basal con la finalidad de evaluar si tiene algún tipo de correlación con la erosión.

Otro dato de cobertura forestal medido en campo es el porcentaje cubierto por el dosel forestal (Cuadro 3 y

Cuadro 6) y la cobertura del piso forestal que se subdivide en los porcentajes que resultaron de; vegetación, residuos, suelo desnudo, roca (este incluye piedras).

Analizando los datos recabados en campo para estas variables se encontró que en general se obtuvo un buen porcentaje de cobertura catalogándola como alta para los dos sitios de estudio basándose en la categoría de Miura (2000); Miura *et al.* (2002) y Miura *et al.* (2003).

3.3.4. Variables edáficas

De las variables edáficas recabadas se obtuvieron los Cuadro 4Cuadro 7 donde se presentan datos de infiltración en pulgadas por hora (in h^{-1}), datos de resistencia a la penetración que se midieron en algunos casos hasta las 24 pulgadas de profundidad y el promedio de la profundidad del suelo. Para Zoquiapan la infiltración medida en cada punto de muestreo fue variable, el rango de rapidez encontrado va de rápida a muy rápida en la mayoría de los puntos y un punto con clasificación moderadamente rápida (BP-VI-2) en la clasificación de USDA (2000) y para Ajuchitlán se clasificó en rápida. Las medidas de resistencia a la penetración que se midió para las primeras tres pulgadas de profundidad indican que en Zoquiapan esta variable se clasifica de baja a moderada mientras que para Ajuchitlán se clasificó como alta, habiendo inclusive sitios en los que la compactación fue extremadamente alta (Schoeneberger *et al.*, 2002). Solo se tomó en cuenta la primera capa del suelo para su análisis (las primeras 3 pulgadas) debido a que interviene directamente con los impactos o la fuerza erosiva del agua. La profundidad del suelo encontrada es catalogada como profunda a muy profunda para Zoquiapan y muy somero para Ajuchitlán (FAO, 1993).

Las variables que se determinaron en laboratorio sobre las muestras de suelo fueron: el pH que para Zoquiapan se determinó como fuertemente ácido a muy fuertemente ácido y para Ajuchitlán desde ligeramente ácido a ligeramente alcalino (Moreno, 1978); basándonos en la clasificación de Castellanos *et al.* (2000) la materia orgánica resultó ser muy alta para los dos sitios debido a que se encuentran en áreas forestales y existe aporte de materia orgánica por los residuos. La estabilidad de agregados evaluada indica que el suelo tiene un alto porcentaje de agregados estables para ambos sitios (Florentino, 1998). La densidad aparente presente en cada punto de muestreo estuvo en un rango de 0.59-0.72 para Zoquiapan y de 0.8-1.5 en Ajuchitlan; la textura es clasificada como franco-arenosa y franco-arcillosa para Zoquiapan y Ajuchitlan respectivamente.

3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

3.4.1. Bosque templado (Zoquiapan, México)

Las 20 covariables seleccionadas (Ver codificación en Apéndice 6.3), las cuales se piensa que influyen en la variable respuesta fueron analizadas mediante la siguiente matriz de correlación (Figura 5).

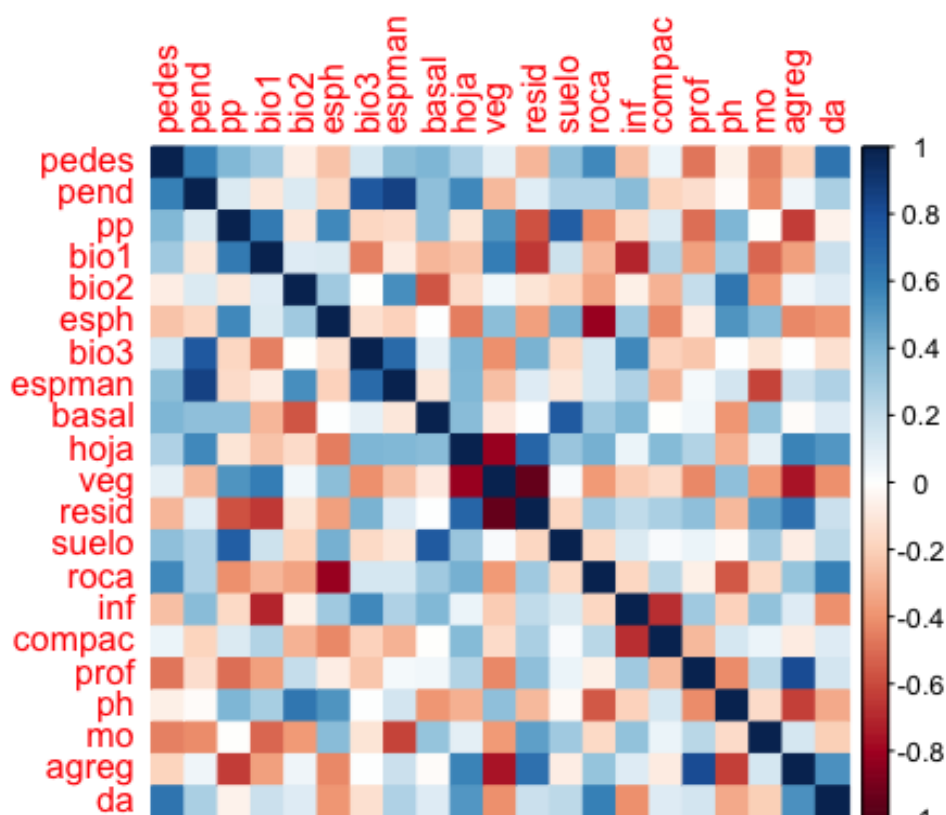


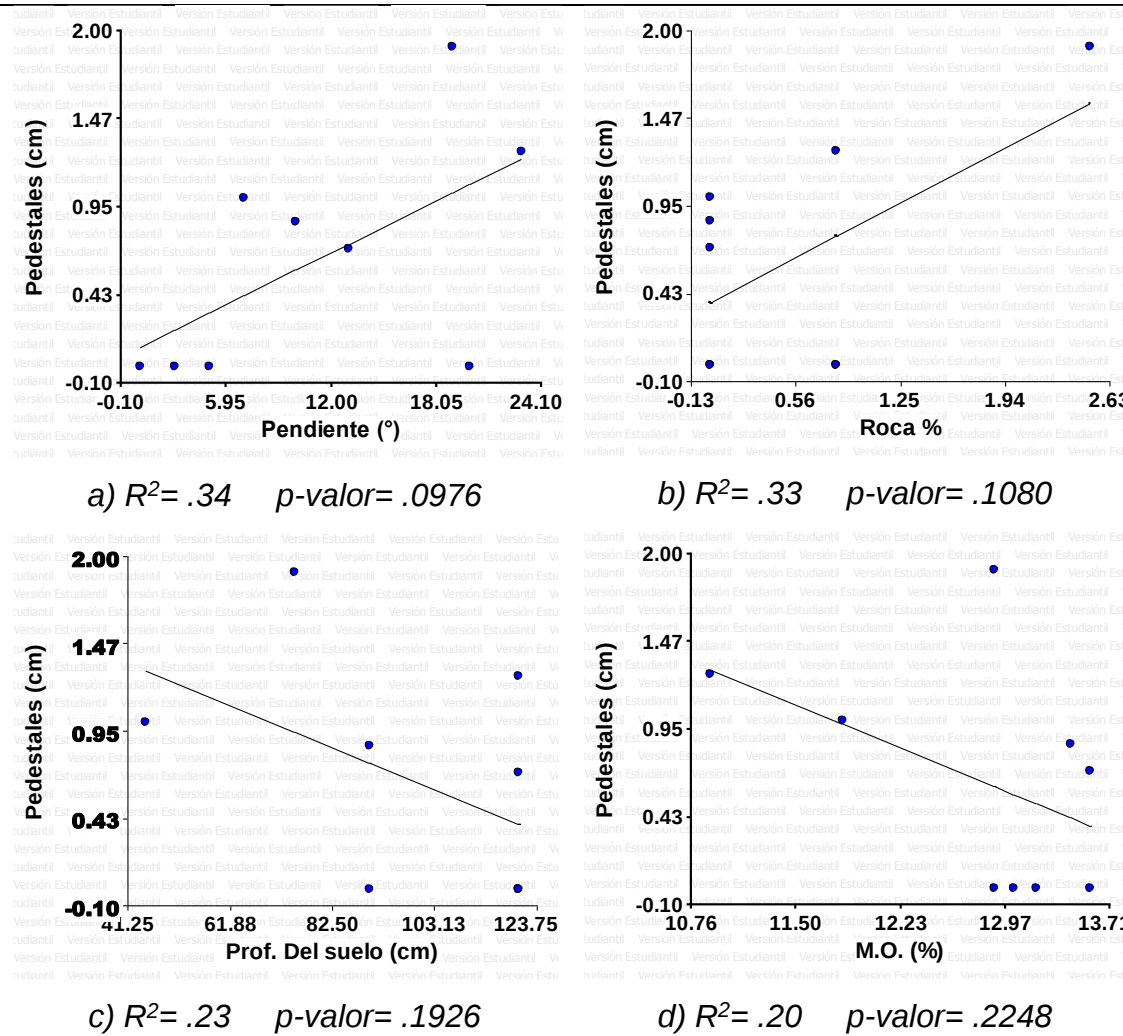
Figura 5. Matriz de correlación para las variables de Zoquiapan, México.

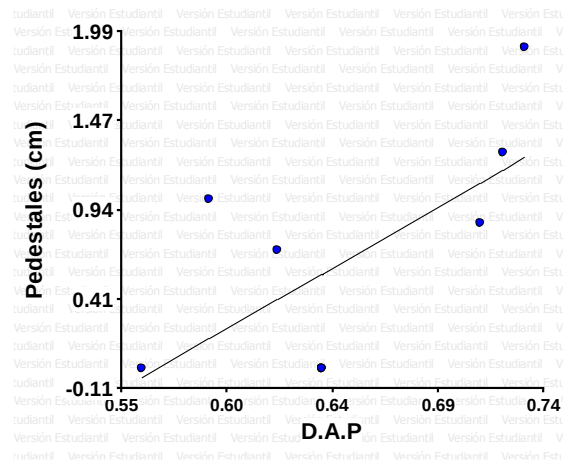
Un primer filtro de aquellas covariables mayormente correlacionadas con la variable respuesta son (Cuadro 9):

Cuadro 9. Variables más correlacionadas para Zoquiapan, México.

Variables	Pendiente (%)	Roca (%)	Profundidad (cm)	Materia Orgánica (%)	D.A.P
Coefficiente de correlación de Pearson	0.59	0.57	-0.48	-0.45	0.64

Las variables mencionadas en el cuadro son las que mediante el coeficiente de correlación de Pearson resultaron ser las más importantes en explicar la erosión del suelo y para determinar su importancia uno a uno se realizaron los siguientes análisis de regresión lineal con un alfa de 0.05, los cuales se presentan en la figura 6.





e) $R^2 = .42$ $p\text{-valor} = .0573$

Figura 6. Regresión lineal entre; a) Pendiente y pedestales, b) Porcentaje de roca y pedestales, c) Profundidad del suelo y pedestales, d) Materia orgánica y pedestales y e) Densidad aparente y pedestales para Zoquiapan, México.

Para reforzar el resultado anterior se realizó un Análisis de exploración mediante Componentes Principales (ACP) este tipo de análisis es importante ya que se analizan las interacciones entre las variables, El siguiente gráfico (Figura 7) corresponde a los 2 primeros componentes principales de los datos, contemplando también a la variable respuesta, ambos componentes aportan un valor acumulado del 73.8 % de la variabilidad de los datos. Analizando el resultado se determina que además de las variables seleccionadas anteriormente también resultaron importantes las variables de suelo desnudo, compactación, pendiente, espesor del mantillo y DAP los cuales tienen una correlación positiva; las variables de materia orgánica, infiltración, profundidad del suelo presentaron una correlación negativa, esto significa que a menor cantidad de estas variables se tiene mayor erosión en forma de pedestales.

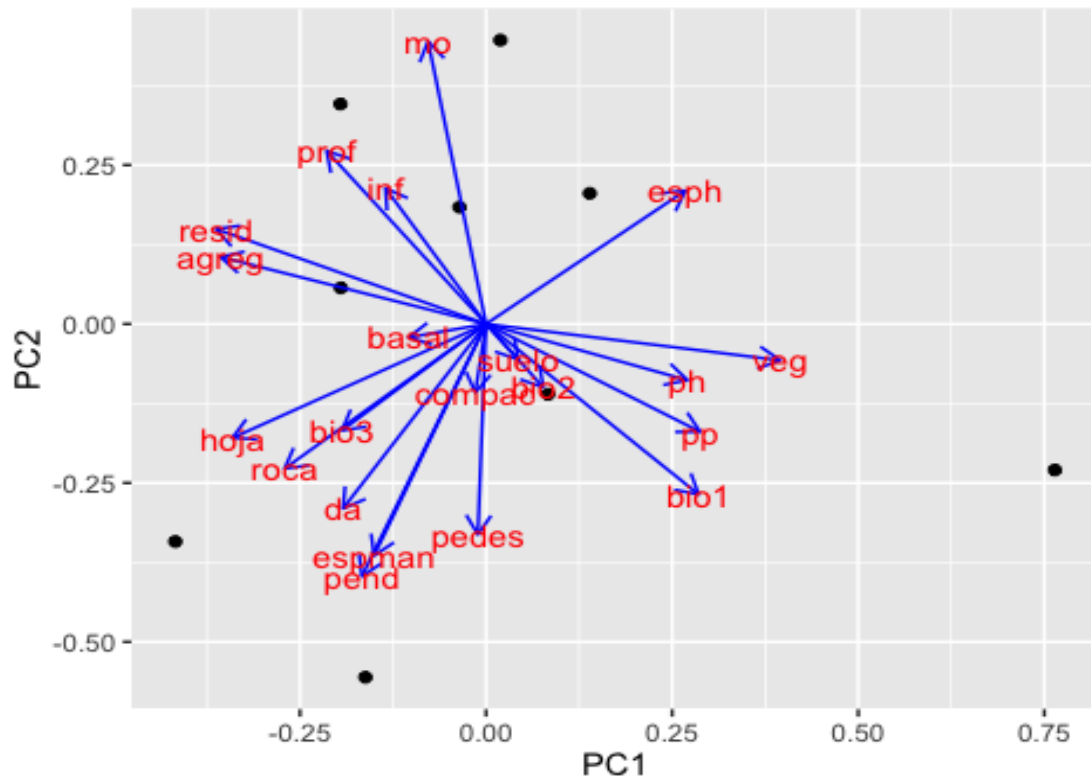


Figura 7. ACP para las variables de Zoquiapan, México.

De los análisis estadísticos expuestos se puede deducir que las variables de erosión por los pedestales está significativamente correlacionada con la pendiente encontrada en el sitio ($R^2 = .34$ y $p\text{-valor} = .0976$ (Figura 6a)) para este resultado es importante aclarar que por motivo de que el estudio fue realizado en espacios naturales y por tanto no controlados, resultados como la antes propuesta puede ser aceptable además de que en el primer filtro (con la correlación de Pearson) esta variable resultó con mayor correlación, además en la ACP el ángulo que forman las dos líneas es agudo (Figura 7) el cual nos indican correlaciones positivas, esto indica la importancia de la pendiente en la erosión del suelo tal como lo describen diversos autores (Alvarado *et al.*, 2007; Cerdá, 2011; Correa & Aliaga, 2010; Durán *et al.*, 2014; Figueroa *et al.*, 1991; PASOLAC, 2005). Al analizar la correlación que existe entre los datos se detectó que la erosión en forma de pedestales está relacionada positivamente con el espesor del mantillo debido a que el ángulo entre ambos datos es agudo esto quiere decir que a mayor biomasa de mantillo encontrado en los puntos de muestreo la

erosión en forma de pedestales fue mayor, lo que podría explicarse a que el mantillo se encuentra en una etapa de descomposición el cual está compuesto por partículas grandes de residuos y no está estructuralmente estable. Se encontró correlación positiva relativamente alta de la variable de erosión en forma de pedestales con la presencia de roca ($R^2 = .33$ y $p\text{-valor} = .1080$ (Figura 6b)) en la superficie del suelo explicándose de la siguiente manera, al haber arrastre o erosión del suelo fino quedan expuestos estos tipos de materiales rocosos y quedan como un indicio de erosión (Alvarado *et al.*, 2007; Muñoz *et al.*, 2006). Este problema de degradación se encuentra positivamente relacionada con el porcentaje de suelo desnudo encontrado en los sitios estudiados (Figura 7) debido a que al no haber cobertura que proteja al suelo el problema de la erosión se presenta con mayor intensidad (Durán *et al.*, 2014; Iniestra & Ramírez, 2013; Miura *et al.*, 2015; Pérez *et al.*, 2012). Las otras variables medidas (Porcentaje de cobertura del dosel, porcentaje de cobertura por vegetación y porcentaje de residuos) al analizarlas individualmente no presentaron mayor posición en relación a la erosión por pedestales para estos sitios, lo cual no quiere decir que no sean importantes ya que como se explicó anteriormente el suelo desnudo que resulta de restar la superficie cubierta por todos los materiales presentes en el área medida resultó muy importante para explicar el problema de erosión derivando la importancia de toda la cobertura presente en el piso forestal.

El resultado del análisis de exploración (Figura 7) indica que la compactación del suelo está relacionada positivamente con la erosión del suelo en pedestales esto quiere decir que a mayor compactación del suelo se encontró mayor altura en los pedestales medidos en campo (Desoky, 2011; Imeson & Curts, 2004; Spaeth *et al.*, 1996), por lo tanto, podría decirse que existe más erosión en suelos compactados por lo menos en las primeras 3 pulgadas del suelo porque al haber presencia de compactación el agua no puede infiltrarse en el suelo produciendo escurrimiento superficial y causando erosión, otra variable que mostró relación fuerte ($R^2 = .42$ y $p\text{-valor} = .0573$ (Figura 6e)) y resultó importante en el ACP (Figura 7) es la densidad aparente del suelo (DAP) indicando que a mayor densidad puede presentarse mayor erosión ya que los suelos más gruesos (con

mayor porcentaje de arenas) son más susceptibles a ser erosionados (Imeson & Curts, 2004; Iniestra & Ramírez, 2013; SEMARNAT-UACH, 2002; Vásquez-méndez *et al.*, 2010). Los valores de la materia orgánica ($R^2 = .20$ y $p\text{-valor} = .2248$ (Figura 6d)) e infiltración, están negativamente correlacionados con la erosión dado que el ángulo entre estas dos variables y la erosión está cercana a los 180° , esto quiere decir que a mayor materia orgánica presente y mayor tasa de infiltración existe menos erosión por pedestales, la materia orgánica es muy importante para la estabilidad del suelo haciéndolo más resistente a la erosión (CORNARE, 1995; Imeson & Curts, 2004). El resultado de la infiltración se explica a que al haber mayor tasa de este factor, el agua se infiltra ejerciendo control sobre la generación de escorrentía superficial (De Regoyos, 2003). Por último, la profundidad del suelo está ligeramente correlacionada con la disminución de la erosión ($R^2 = .23$ y $p\text{-valor} = .1926$ (Figura 6c)) ya que de este depende la capacidad de almacenamiento de humedad en el suelo y del cual se desprende el volumen de flujo superficial (Morgan *et al.*, 1984).

3.4.2. Selva Baja Caducifolia (Ajuchitlan, Morelos)

El gráfico siguiente (Figura 8) muestra la matriz de correlaciones entre las variables en el conjunto de datos encontrados en la selva baja caducifolia, incluyendo la variable respuesta.

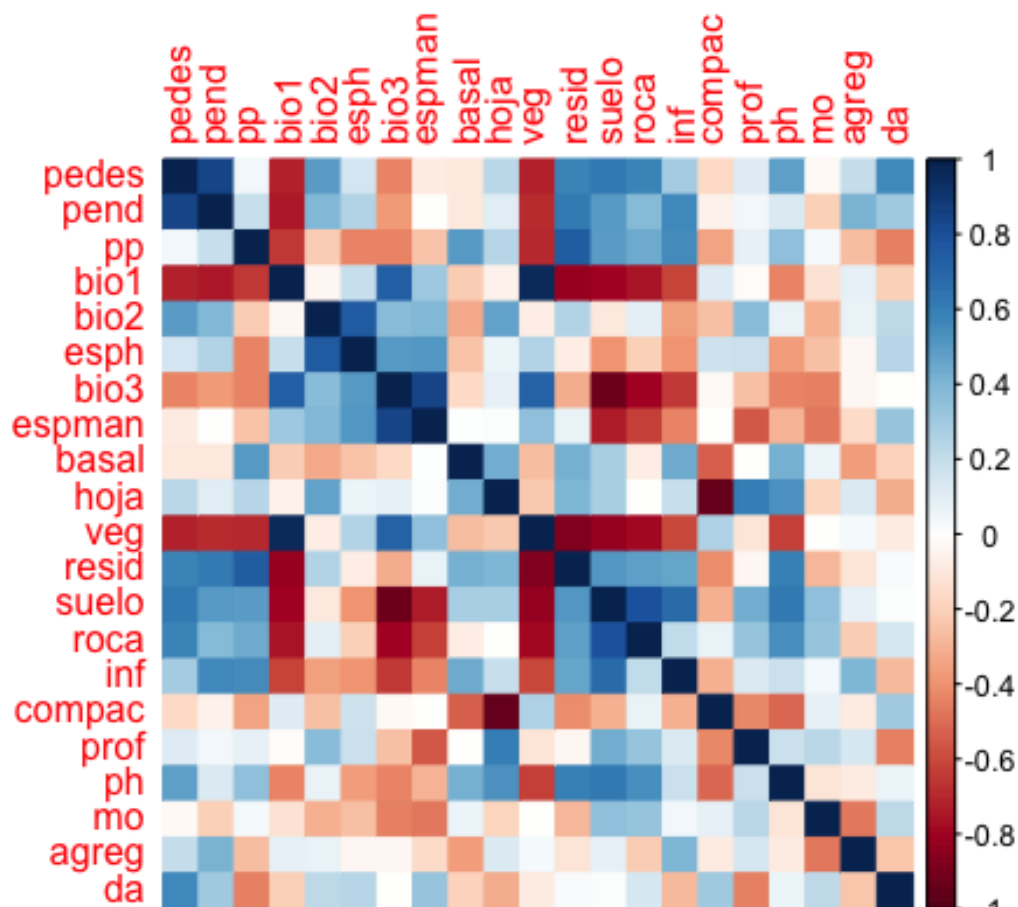


Figura 8. Matriz de correlación para las variables de Ajuchitlán, Morelos.

Un primer filtro de aquellas covariables mayormente correlacionadas con la variable respuesta se presenta en el Cuadro 10:

Cuadro 10. Variables más correlacionadas para Zoquiapan, México.

Variables	Pend	Bio. Veg	Veg	Resid	Suelo	Roca	DAP
Coefficiente de correlación de Pearson	0.84	-0.72	-0.72	0.58	0.62	0.58	0.57

Una alternativa que se propone es realizar regresiones lineales uno a uno entre cada una de las covariables y la variable respuesta, en la figura 9 se presenta las regresiones lineales entre las variables que resultaron importantes en el primer filtro.

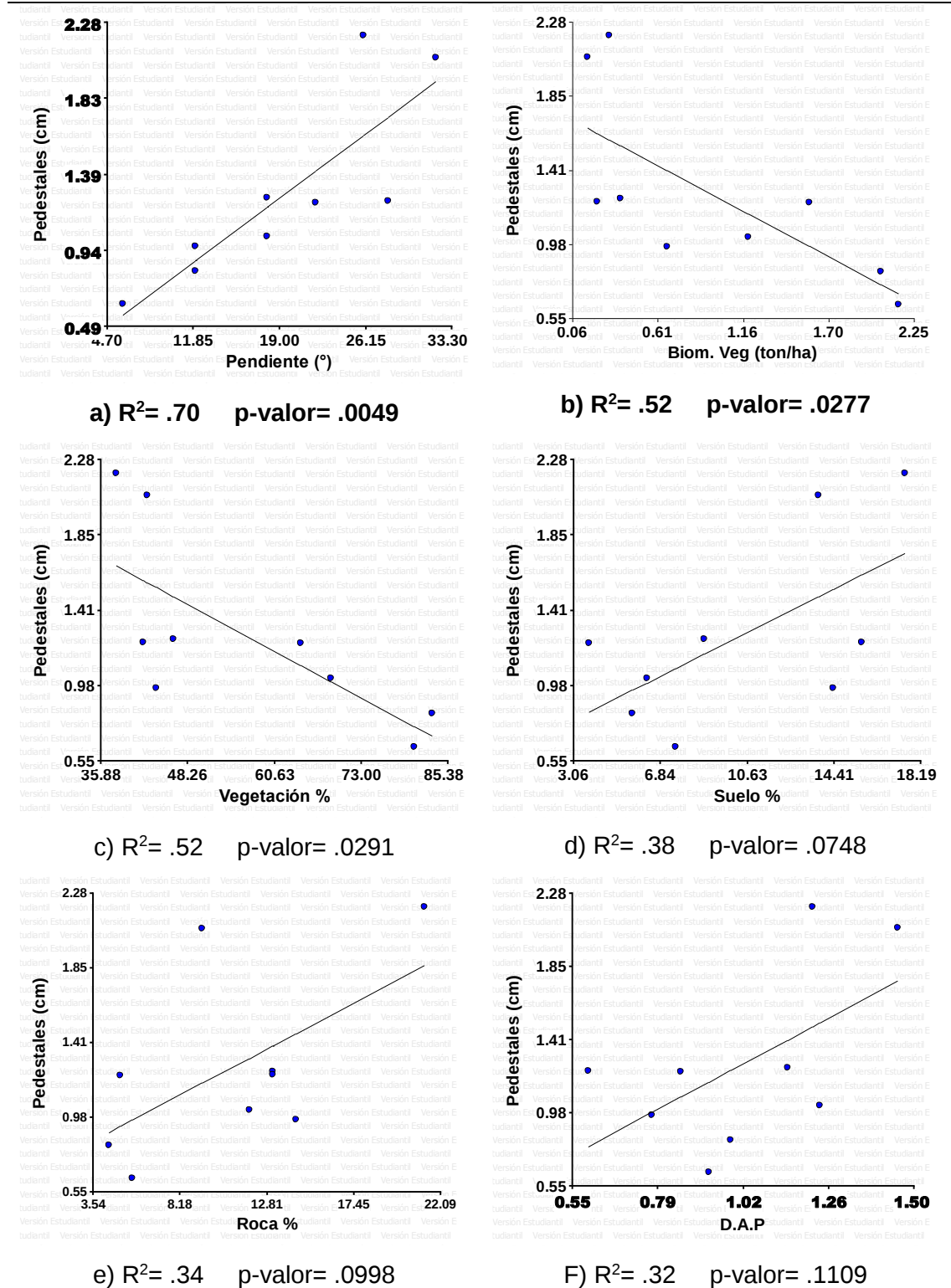


Figura 9. regresión lineal entre; a) Pendiente y pedestales, b) Biomasa de la vegetación y pedestales, c) Vegetación y pedestales, d) Suelo expuesto y pedestales, e) Roca y pedestales, f) Densidad aparente y pedestales para Ajuchitlán, Morelos.

El siguiente gráfico (Figura 10) corresponde a los 2 primeros componentes principales que explican el 88.7 % de la variabilidad total de los datos, en él se analiza la interacción entre las covariables estudiadas y la variable respuesta.

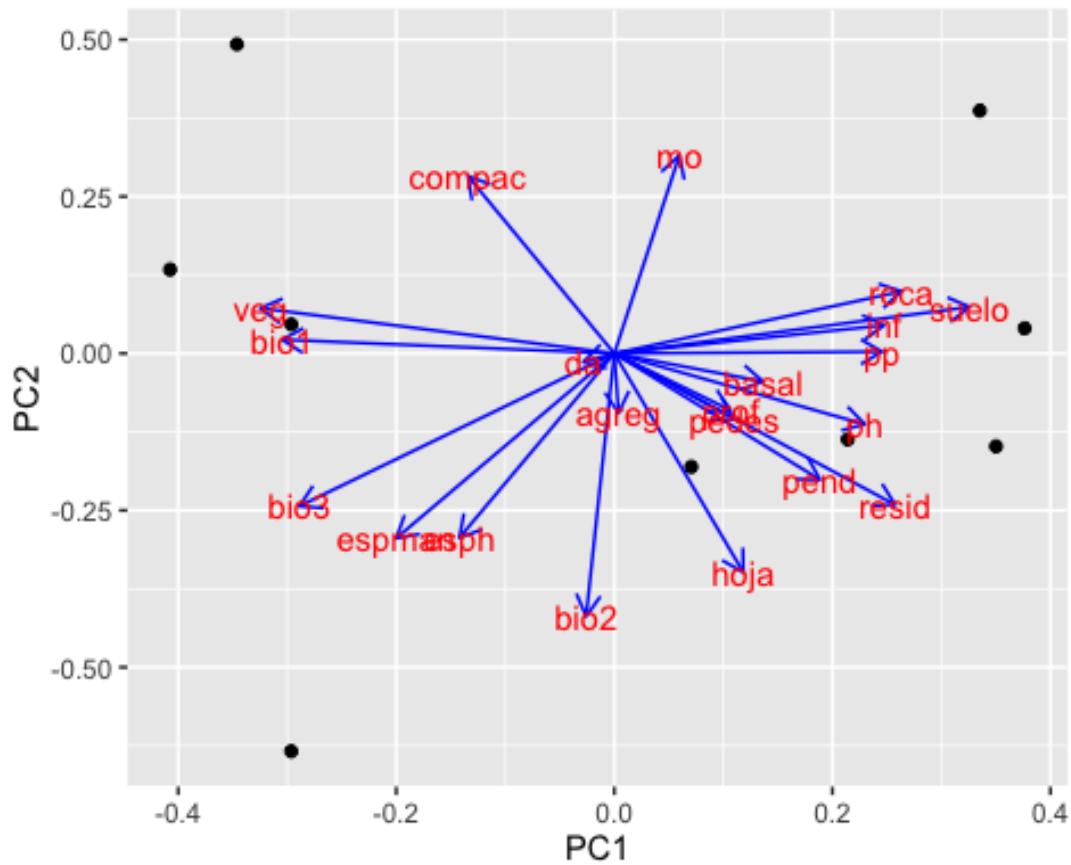


Figura 10. ACP para las variables de Ajuchitlán, Morelos.

Resultan ser importantes mediante el ACP (Figura 10) las siguientes variables: Pendiente, la profundidad del suelo, el porcentaje de residuos en el piso forestal, los cuales tienen una correlación positiva; las covariables de porcentaje de vegetación presente en el piso forestal y la biomasa de esta resultaron tener una correlación negativa.

Reafirmamos nuevamente en este sitio la importancia de la pendiente y su relación con la erosión en forma de pedestales ($R^2 = .70$ y $p\text{-valor} = .0049$ (Figura

9a)) teniendo una correlación positiva muy fuerte siendo significativo a un alfa de 0.05 resultado que también se obtuvo en el ACP (Figura 10), con esto se confirma lo propuesto por varios autores (Alvarado *et al.*, 2007; Cerdá, 2011; Correa & Aliaga, 2010; Durán *et al.*, 2014; Figueroa *et al.*, 1991; PASOLAC, 2005). La vegetación ($R^2 = .52$ y $p\text{-valor} = .0291$ (Figura 9c)) presente en el sitio (% en el piso forestal) y su biomasa ($R^2 = .52$ y $p\text{-valor} = .0277$ (Figura 9b)) también resultó importante en este tipo de vegetación por su correlación negativa que también resultó en el ACP (Figura 10) (Adema *et al.*, 2001; Cerdá, 2011; Durán *et al.*, 2014; López *et al.*, 2013; Miura *et al.*, 2015; Serrato *et al.*, 1999), resultaron también ser importantes la cantidad de residuos y la profundidad del suelo con una correlación positiva lo cual no tiene sentido ya que estos factores según autores citados en este trabajo disminuyen la erosión del suelo. El porcentaje de suelo desnudo resultó con una correlación positiva ($R^2 = .38$ y $p\text{-valor} = .0748$ (Figura 9d)) al igual que en Zoquiapan esto significa que a mayor porcentaje de suelo desnudo existe mayor erosión en pedestales de aquí resulta la importancia de la cobertura del piso forestal (Durán *et al.*, 2014; Iniestra & Ramírez, 2013; Miura *et al.*, 2015; Pérez *et al.*, 2012), el porcentaje de Roca ($R^2 = .34$ y $p\text{-valor} = 0.0998$ (Figura 9e)) presente en el piso forestal resultó importante con una correlación positiva al igual que la D.A.P. ($R^2 = .32$ y $p\text{-valor} = .1109$ (Figura 9f)) esto significa que a mayor valor de estas variables puede resultar en un mayor valor en la erosión.

3.5. CONCLUSIONES

Mediante el levantamiento de los datos y su posterior análisis para los dos sitios se determinó que en ambas áreas de estudio se tiene una erosión que es clasificada como ligera explicándose porque las áreas de estudio son zonas forestales bajo algún tipo de protección y de ahí surge la importancia de los diferentes factores que intervienen en la protección del suelo.

Al realizar los estadísticos para evaluar la correlación de la variable respuesta y las covariables medidas en el Bosque templado (Zoquiapan) resultaron importantes mediante el primer análisis de correlación las variables de pendiente del sitio, porcentaje de roca presente en el piso forestal y la densidad aparente mientras que resultaron con una correlación negativa las variables de profundidad del suelo y el porcentaje de materia orgánica del suelo, estas variables fueron correlacionadas mediante una regresión lineal para determinar el grado de importancia resultando con mayor correlación las variables de **pendiente y densidad** aparente del suelo, posteriormente se realizó un ACP y resultaron importantes a considerar las variables de porcentaje de suelo desnudo presente en el sitio, la compactación, la pendiente, la DAP los cuales tuvieron una correlación positiva y las variables de materia orgánica, infiltración y la profundidad del suelo con correlación negativa. Para la vegetación de Selva baja caducifolia (Ajuchitlán) resultaron importantes en el primer análisis con una correlación positiva las variables de pendiente del terreno, porcentaje de suelo expuesto, porcentaje de roca presenten y la densidad aparente y con correlación negativa las variables de vegetación y la biomasa de esta, con la regresión lineal aplicada a estas variables resultaron con mayor fuerza de correlación las variables de **pendiente**, porcentaje de **vegetación** con su **biomasa** y el porcentaje de suelo desnudo. Al realizar el ACP tuvieron correlación positiva con

la variable respuesta la pendiente del terreno, la profundidad del suelo, el porcentaje de residuo presente en el piso forestal y resultaron con una correlación negativa las variables de porcentaje de vegetación y su biomasa. Es así que los factores que influyen sobre la erosión hídrica del suelo en los sitios evaluados son los expuestos y es importante considerarlas en estudios posteriores.

3.6. REFERENCIAS

- Adema, E. O., Babinec, F. J., & Peinemann, N. (2001). Perdida De Nutrientes Por Erosion Hidrica En Dos Suelos Del Caldenal Pampeano. *Ciencia Del Suelo*, 19(2), 144–154.
- Agratronix. (n.d.). SOIL COMPACTION INSTRUCTIONS. USA.
- Alvarado, M., Colmenero, J. A., & Valderrábano, M. de la L. (2007). La erosión hídrica del suelo en un contexto ambiental, en el estado de Tlaxcala, México. *Ciencia Ergo Sum*, 14(3), 317–326.
- Alvarado C., Miguel; Colmenero R., Aurelio; Valderrábano A., M. de la L. (2007). La erosión hídrica del suelo en un contexto ambiental, en el estado de Tlaxcala, México. *Ciencia Ergo Sum*, 14, 317–326.
- Cabria, F., M. Calandroni y Monterubbianesi. 2002. Tamaño y estabilidad de agregados y su relación con la conductividad hidráulica saturada en suelos bajo labranza convencional y praderas. *Cienc. Suelo* 20: 69-80
- Castellanos J. Z.; Uvalle-Bueno J. X. y Aguilar-Santelises A. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. Segunda Edición. México.
- Cerdá, A. (2011). La erosión del suelo y sus tasas en España. *Ecosistemas*, (3).
- CIMMYT. (2013). *Estabilidad de los agregados del suelo tamizando en húmedo, guía útil para comparar las prácticas de manejo de cultivo*. México.
- CONAFOR. (2014). *Protección, restauración y conservación de suelos forestales, manual de obras y prácticas*. (Primera re).
- CONAFOR. (2015). Mejora de la información para promover el manejo forestal para la protección del suelo y del agua, informe final de México. Proyecto FAO-CONAFOR. Zapopan, Jalisco, México.
- CONAFOR-UACH. (2013). *Línea base nacional de degradación de tierras y desertificación* (Informe fi). Zapopan, Jalisco.
- CORNARE, 1995. (1995). Agentes Que Intervienen En La Erosion (pp. 1–39). Retrieved from [http://www.unalmed.edu.co/~poboyca/documentos/documentos1/documentos-Juan Diego/Plnaifi_Cuencas_Pregado/cap 1 y 2 libro erosion.pdf](http://www.unalmed.edu.co/~poboyca/documentos/documentos1/documentos-Juan%20Diego/Plnaifi_Cuencas_Pregado/cap%201%20y%202%20libro%20erosion.pdf)
- Correa, C. P. C., & Aliaga, C. (2010). Evaluación de la pérdida de suelo, asociada al proceso de expansión urbana y reconversión productiva. Caso: Comunas de Los Andes, Quillota y Concón, valle del Aconcagua. *Revista de Geografía Norte Grande*, 49(45), 41–49. <http://doi.org/10.4067/S0718-34022010000100003>

De Regoyos, M. (2003). *Metodología para la evaluación de la erosión hídrica con modelos informáticos. Aplicación del modelo GEOWEPP a dos pequeñas cuencas de Madrid*. Universidad Politécnica de Madrid.

Desoky, M.S. 2011. Impact of land-use and land-management on the water infiltration capacity of soils on a catchment scale. *Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.) Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina*. 184 p.

Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión (2016). Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

Durán, V.H., Rodríguez, C.R., Cuadros, S., Francia, J. R. (2014). Impacto de la erosión y escorrentía en laderas de agroecosistemas de montaña mediterránea. *Ecosistemas: Revista Científica Y Técnica de Ecología Y Medio Ambiente*, 23(1), 66–72.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANISATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). 1993. Modelo para el pronóstico de la dinámica de erosión en los suelos debido a los cambios en el uso de la tierra. Roma-Italia. 96p.

FAO. (2015). *Guía de campo para una evaluación rápida de las funciones protectoras del bosque del suelo y el agua; un método científico sólido, rentable y fácil de aplicar para recopilar datos a fin de promover el manejo forestal para la protección del suelo y el agua*. Roma, Italia.

Figuerola, Benjamin; Amante, Alejandro; Cortes, H. Gregorio; Pimentel, José; Osuna, E. Salvador; Rodríguez, J. Matilde; Morales, F. J. (1991). *Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión*. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.

Florentino, A. 1998. Guía para la evaluación de la degradación del suelo y de la sostenibilidad del uso de la tierra: selección de indicadores físicos. Valores críticos. En: Manejo Sostenible de los Suelos, Manual de Prácticas. Facultad de Agronomía UCV. Maracay- Venezuela. p 68-77.

GARCÍA, E. 1987. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen: (Para Adaptarlo a las Condiciones de la República Mexicana). 4ª edición. Ed. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 217 p.

Gómez, D. J. D. 2008. Determinación de los almacenes de carbono en los compartimentos aéreo y subterráneo de dos tipos de vegetación en la reserva de la Biosfera “Sierra De Huautla”, Morelos, México. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo.

Huerta, J. de J. (2007). *Efecto de la cobertura vegetal y raíces en la erosión del suelo*. Colegio de postgraduados.

Imeson, A., & Curts, M. (2004). La Erosión del Suelo. *Lucinda*, (1), 15.

INEGI. 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los estados

unidos Mexicanos, Tlaquiltenango, Morelos. Clave geoestadística 17025. México.

INEGI. 1981. Carta Estatal de climas escala 1: 500 000. Anexo Cartográfico de la Síntesis Geográfica del Estado de México.

Iniestra, D. J. M., & Ramírez, M. F. (2013). Relación entre la cobertura del terreno y la degradación física y biológica de un suelo aluvial en una región semiárida. *Terra Latinoamericana*, 200–210.

López, Hugo E.; De la Mora, Celia; Ruíz, José A.; Chávez, Á. A. (2013). Efecto de la cobertura de suelo de tres cultivos sobre la erosión hídrica. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*. <http://doi.org/10.5154/r.rchsza.2012.06.015>

Loredo Ostí, C., Beltrán Lopez, S., Moreno Sánchez, F., & Casiano Domínguez, M. (2007). *Riesgo de la erosión hídrica y proyección de acciones de manejo y conservación del suelo en 32 microcuencas de San Luis Potosí*.

Miranda F. Hernández X. E. 1963. Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Bol. Soc. Bot.* 29:1-179. México.

Miura, S. 2000. Proposal for a new definition to evaluate the status of forest floor cover and floor cover percentage (FCP) from the viewpoint of the protection against raindrop splash. *Journal of Japanese Forest Society*, 82: 132–140.

Miura, S., Hirai, K. & Yamada, T. 2002. Transport rates of surface materials on steep forested slopes induced by raindrop splash erosion. *Journal of Forest Research*, 7: 201–211.

Miura, S., Yoshinaga, S. & Yamada, T. 2003. Protective effect of floor cover against soil erosion on steep slopes forested with *Chamaecyparis obtusa* (hinoki) and other species. *Journal of Forest Research*, 8: 27–35.

Miura, Satoru; Ugawa, Shin; Yoshinaga, Shuichiro; Yamada, Tsuyoshi; Hirai, K. (2015). Floor Cover Percentage Determines Splash Erosion in *Chamaecyparis obtusa* Forests. *Forest, Range & Wildland Soils*, (May). <http://doi.org/10.2136/sssaj2015.05.0171>

Moreno, D. R. 1978. Clasificación del pH del suelo, contenido de sales y nutrimentos asimilables. INIA-SARH. México.

Moreno, M. P., Luis, J., Prieto, P., & Castellón, A. E. E. (2003). Comparación de métodos en la estimación de erosión hídrica A comparison of methods in estimating soil water erosion, *Investigac*(821), 23–36.

Morgan, R.P.C., Morgan, D.D.V. y Finney, H.J. (1984). A predictive model for the assessment of soil erosion risk. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 30: pp. 245- 253

Muñoz G., Rogelio; Ventura R., Eusebio; Gonzalo S., Enrique; Dominguez C., Miguel; Luna Z., Filiberto; Oropeza M., J. L. (2006). *Erosión hídrica en la microcuenca San Pedro Huimilpan: valoración integrada para su control*. Universidad Autónoma de Querétaro.

Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. 2002. que establece las

especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Oldemann, L. R. (1988). Guidelines for General Assessment of the Status of Human-Induced Soil Degradation. Global Assessment of Soil Degradation (GLASOD). *International Soil Reference and Information Centre*. Retrieved from http://www.isric.org/sites/all/modules/pubdlcnt/pubdlcnt.php?file=/isric/webdocs/docs/ISRIC_Report_1988_04.pdf&nid=332

Ortiz S., Ma. de la L., M. A. y J. W. E. B. (1994). *Evaluación, cartografía y políticas preventivas de la degradación de la tierra*. (Universidad Autónoma Chapingo- Comisión Nacional de Zonas Áridas- Colegio de Postgraduados, Ed.). Chapingo, México.

Osman, K. T. (2014). *Soil Degradation , Conservation and Remediation*. <http://doi.org/10.1007/978-94-007-7590-9>

PASOLAC. (2005). *Manual de Métodos Sencillos para estimar Erosión Hídrica*. 1. (B. A. J. Somarriba Chang Matilde, Obando Miguel, Ed.). Managua, Nicaragua.

Pérez Nieto, Joel; Valdés Velarde, Eduardo; Ordaz Chaparro, V. M. (2012). Cobertura Vegetal Y Erosión Del Suelo En Sistemas Agroforestales De Café Bajo Sombra. *Terra Latinoamericana*, 30(3), 249–259.

Prego, A. J. (1962). La érosion eólica en la república argentina. *Ciencia E Investigación*.

R Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

REY, C. J. A. 1975. Estudio de suelos de la Estación de Enseñanza, Investigación y Servicios Forestales de Zoquiapan. *Información Técnica de Bosques* 1(4): 64 pp U.A.Ch., Chapingo, México.

Ruiz G., P. 2015. Diseño de tecnologías agroforestales con mayor potencial de fijación de carbono en Ajuchitlán, Morelos. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México.

Rzedowski J. 2006. Vegetación de México. 1ra edición digital. Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad. México 50 p.

Schoeneberger, P.J., Wysocki, D.A., Benham, E.C., and Broderson, W.D. (editors), 2002. Field book for describing and sampling soils, version 2.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.

Semarnat. (2008) Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. México. 2008.

SEMARNAT. (2012). *Informe de la situación del medio ambiente en México*.

Semarnat; C.P. (2003). *Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1:250 000. Memoria nacional 2001-2002*. México.

SEMARNAT-UACH. (2002). *Evaluación de la pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica en la República Mexicana, esc. 1:1 000 000*.

Serrato, B., Díaz, R., Bermúdez, L., & Laguna, H. (1999). Óptimo de cobertura vegetal en relación a las pérdidas de suelo por erosión hídrica y las pérdidas de lluvia por intercepción. *Papeles de Geografía*, 5–16.

Shepherd, T. G., S. Saggar, R. H. Newman, C. W. Ross, and J. L. Dando. 2001. Tillage-induced changes to soil structure and organic carbon fractions in New Zealand soils. *Aust. J. Soil Res.* 39: 465-489.

Spaeth, K. E., T. L. Thurow, W. H. Blackburn y F. B. Pierson. 1996. Ecological dynamics and management effects on rangelands hydrologic processes. pp. 25-51. In: Spaeth, K. E., F. B. Pierson, M. A. Weltz y R. G. Hendricks. Society for Range Management. Denver, CO, USA.

Torres Benites, E., Cortes Becerra, J., Mejía Sáenz, E., Exebio García, A., Santos Hernández, A. L., & Piñón Delgadillo Eugenia, M. (2003). Evaluación de la degradación de los suelos en la cuenca “El Josefino”, Jesús María, Jalisco. *Terra Latinoamericana*, 21, 116–126.

USDA. (2000). Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo, 88.

Vásquez-méndez, R., Ventura-ramos, E., Oleschko, K., Hernández-sandoval, L., Parrot, J., & Nearing, M. A. (2010). Soil erosion and runoff in different vegetation patches from semiarid Central Mexico. *Catena*, 80(3), 162–169. <http://doi.org/10.1016/j.catena.2009.11.003>

ZAVALA C., F. 1984. Sinecología de la vegetación de la Estación de Enseñanza e Investigación Forestal Zoquiapan, estados de México y Puebla. Tesis de licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México. 164 p

4. PROPUESTA DE MONITOREO

Tomando en cuenta el resultado obtenido en el capítulo III de este trabajo de investigación además de la experiencia en el levantamiento de los datos en los ecosistemas forestales evaluados se escribe esta propuesta de monitoreo de la erosión hídrica del suelo en áreas forestales, en seguida se enlistan una serie de pasos a seguir para facilitar y mejorar la metodología.

1. Ubicar bien el área de muestreo y realizar una zonificación (unidades biofísicas) previa para tener amplio conocimiento de sus características y poder trabajar sobre el área de interés. Tomando en cuenta los resultados obtenidos en esta investigación es recomendable además de los caracteres de zonificación tomados en cuenta en este estudio, clasificar detalladamente por distintos grados de pendiente y por diferente densidad de cobertura. Esto permitirá seleccionar áreas distintas y no hacer varias repeticiones en áreas homogéneas que nos pueda llevar a incrementar los gastos del levantamiento de la información.
2. Incluir un número necesario de puntos de muestreo, sobre todo seleccionar de las unidades biofísicas aquellas que tengan diferencias marcadas para tener una mayor variabilidad en la información y buscar la correlación y la tendencia de cambio en los datos (Tomando en cuenta que unidades biofísicas parecidas tendrán resultados similares y se dificultaría encontrar diferencias en las correlaciones).
3. Para la propuesta entonces de monitoreo para estos ecosistemas forestales enfocarse en medir las variables de; Pendiente del terreno, el porcentaje de vegetación y su biomasa presente en el piso forestal. El

porcentaje de suelo expuesto en el piso forestal también resulta importante al igual que el porcentaje de roca. Entre las variables edáficas es importante medir la profundidad del suelo, su compactación, la infiltración, su densidad aparente y su contenido de materia orgánica. Es claro que las variables propuestas en este estudio podrían variar en otro tipo de vegetación así que tendrían que hacerse estudios considerando las características del sitio y seleccionando las variables que podrían influir en la erosión del suelo.

4. Estos datos se levantarían en la misma parcela de muestreo recomendada por CONAFOR-FAO (2015) incluyendo el levantamiento de las variables que resultaron más importantes en este estudio. El prototipo de la parcela de muestreo se muestra en la figura 11 donde la primera línea será establecida en la dirección de la pendiente y la segunda perpendicular a ella, hay que tomar en cuenta que las modificaciones en la parcela de muestreo ya se habían hecho previamente en este trabajo de investigación para la medición de todos los datos propuestos.

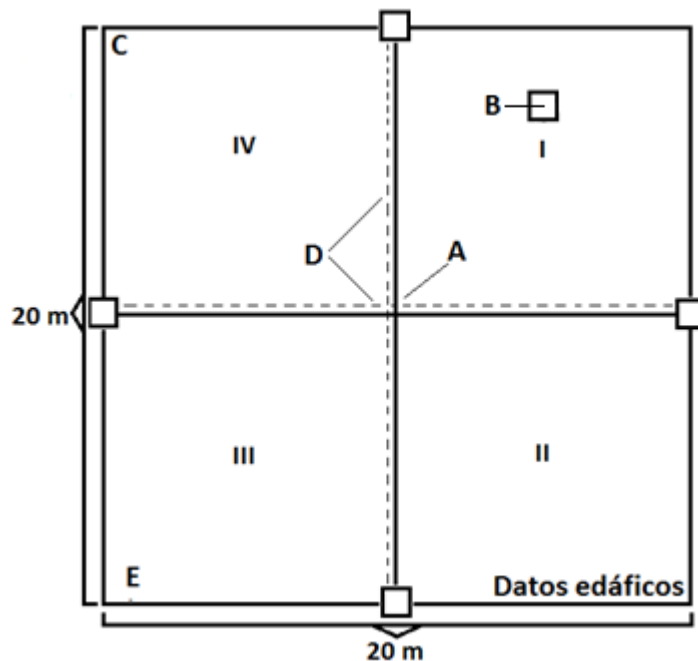


Figura 11. Propuesta de parcela de muestreo.

Para la observación y toma de datos a continuación se proponen algunos pasos a seguir.

- a) Una vez ubicado el punto central (**A**) de la parcela, hacer las anotaciones de la información general que incluye información de pendiente del terreno, el uso del suelo, coordenadas geográficas y las que se crean pertinentes dependiendo del ecosistema forestal.
- b) En el punto **B** localizado en el cuadrante **I** levantar los datos de biomasa.
- c) En el punto **C** medir el diámetro de los árboles encontrados para calcular el área basal por hectárea.
- d) Sobre la línea (**D**) levantar los datos de cobertura arbórea con un densitómetro que puede ser usado también para medir la cobertura del piso forestal o en su caso levantar esta información mediante la toma de una fotografía en cada cuadro localizado al extremo de cada línea marcada y analizarlo en el programa libre llamado SamplePoint.
- e) Hacer las mediciones de indicios de erosión en forma de pedestales en el cuadrante **III (E)**, se recomienda hacer la observación en todo un cuadrante ya que en una superficie menor a veces es difícil encontrarlos.
- f) En toda la parcela de muestreo observar si existen canalillos y cárcavas para proceder a su medición.
- g) En el cuadrante **II** medir las variables edáficas y levantar la muestra del suelo.

Hay que tomar en cuenta que en este cuadro de muestreo deben tomar prioridad los datos que resultaron importantes en este estudio y este es una base de monitoreo incluyendo las experiencias obtenidas y no es necesariamente una receta a seguir, así que se pueden hacer las modificaciones e incluir variables que se crean necesarias.

5. Es importante considerar las interacciones entre todas las variables estudiadas para detectar cuales están correlacionadas entre sí pudiendo descartar las que aporten la misma información con la finalidad de hacer este método más rápido

pero sin que se pierda su efectividad.

Finalmente se invita a seguir con este tipo de monitoreo para ir perfeccionando un método que pueda adaptarse a otro tipo de vegetación en este caso sería interesante detectar la dinámica de los factores evaluados y cómo influyen esos cambios sobre la erosión del suelo, si es posible, seguir con el monitoreo de los puntos evaluados en este trabajo de investigación para detectar esos cambios que podrían explicar este problema y poder proponer estrategias de protección del suelo en base a los conocimientos en cada sitio.

5. CONCLUSIONES GENERALES

Tal como se planteó en los objetivos se encontraron aquellas variables que influyen en la erosión del suelo además de determinar que la erosión presente en ambos ecosistemas forestales es catalogada como ligera, en caso de que se quiera seguir con el monitoreo de los ecosistemas que se tomaron en cuenta en este estudio en el trabajo se encuentran los puntos de referencia.

Es importante mencionar que la zonificación previa de la zona de estudio es recomendable para tener amplio conocimiento de sus características y poder trabajar sobre el área de interés, para este caso tomando en cuenta los resultados es recomendable además de los caracteres de zonificación tomados en cuenta en este estudio clasificar detalladamente por distintos grados de pendiente y por diferente densidad de cobertura ya que influyen en la erosión del suelo, además, si se replicara este método es importante incluir un número necesario de puntos de muestreo para tener mayor variabilidad en la información. En la propuesta de monitoreo de ecosistemas forestales darle importancia a las variables de: Pendiente del terreno, el porcentaje de vegetación y su biomasa presente en el piso forestal, el porcentaje de suelo expuesto en el piso forestal y el porcentaje de roca. Entre las variables edáficas es importante medir la profundidad del suelo, su compactación, la infiltración, su densidad aparente y su contenido de materia orgánica, estos datos se levantarían en la misma parcela de muestreo recomendada por FAO-CONAFOR (2015) incluyendo el levantamiento de estas variables. Cabe mencionar que no sería necesario incluir todas las variables medidas a menos que sea un nuevo estudio exploratorio como este o se replique en otro tipo de ecosistema forestal. Para este trabajo de investigación se requirió de mucho trabajo de campo ya que como se pudo percibir se midieron muchas variables, se espera que los resultados sirvan para mejora del levantamiento de la información para evaluar la erosión del suelo y

que sea replicada para su mejor acondicionamiento y aplicación en diferentes ecosistemas forestales.

6. APÉNDICE

6.1. ÁLBUM FOTOGRÁFICO

1. Instalación de la parcela de muestreo



2. Levantamiento de la información general



3. Medición de la cobertura arbórea



4. Medición de la cobertura del piso forestal



5. Medición de la biomasa en el piso forestal



6. Medición del área basal



7. Medición de la profundidad del suelo



8. Levantamiento de la muestra de suelo



9. Medición de la compactación del suelo



10. Medición de la infiltración



11. Medición de pedestales y canalillos



12. Algunas determinaciones en laboratorio



6.2. FORMATO DE CAMPO

FECHA: _____		COORDENADAS UTM: E: _____ N: _____	
UNIDAD BIOPRODUCTIVA: BO_LI ☐ BP_VI ☐ BPAi_LI ☐		REPETICIÓN: 1ra ☐ 2da ☐ 3ra ☐	
RELIEVE: ALTURA _____msnm. EXPOSICIÓN: _____ PENDIENTE: _____° DIRECCIÓN: _____ LONGITUD: _____ FORMA: _____		CLIMA: PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL: _____ mm. TEMPERATURA MEDIA ANUAL: _____°c	
DATOS SOBRE LA VEGETACIÓN BIOMA: BOSQUE ☐ SELVA BAJA ☐ ESPECIE DOMINANTE: _____ TIPO DE HOJA: _____ TIPO DE MANEJO: _____ ESTRUCTURA: _____			
USO DEL SUELO: _____		TIPO DE ROCA: <u>Roca ígnea extrusiva básica</u>	

DATOS DE BIOMASA (1M ²)							
VEGETACIÓN							
PESO TOTAL EN CAMPO (gr): _____				PESO SUBMUESTRA (gr): _____			
HOJARASCA				MANTILLO			
PESO TOTAL EN CAMPO (gr): _____		PESO SUBMUESTRA (gr): _____		PESO TOTAL EN CAMPO (gr): _____		PESO SUBMUESTRA (gr): _____	
MEDIDAS DEL ESPESOR				MEDIDAS DEL ESPESOR			
NO. MEDICIÓN	ESPESOR (cm)	NO. MEDICIÓN	ESPESOR (cm)	NO. MEDICIÓN	ESPESOR (cm)	NO. MEDICIÓN	ESPESOR (cm)
1		6		1		6	
2		7		2		7	
3		8		3		8	
4		9		4		9	
5		10		5		10	

ÁREA BASAL								
No. Árbol	Especie	Diámetro	No. Árbol	Especie	Diámetro	No. Árbol	Especie	Diámetro
1			6			11		
2			7			12		
3			8			13		
4			9			14		
5			10			15		

MEDIDA DE LA COBERTURA CON EL DENSITOMETRO		D
Leyenda:		
Lectura del dosel: L (hoja) y S (cielo)		
Lectura del suelo: 0 (vegetación); 1 (Raíces); 2 (Hojarasca); 3 (Piedra o roca); 4 (Madera muerta);		
5 (Suelo desnudo).		

Punto No.	Lectura dosel	Lectura suelo		Punto No.	Lectura dosel	Lectura suelo		Punto No.	Lectura dosel	Lectura suelo
1				21				41		
2				22				42		
3				23				43		
4				24				44		
5				25				45		
6				26				46		
7				27				47		
8				28				48		
9				29				49		
10				30				50		
11				31				51		
12				32				52		
13				33				53		
14				34				54		
15				35				55		
16				36				56		
17				37				57		
18				38				58		
19				39				59		
20				40				60		

VARIABLES DE EROSIÓN

PEDESTALES

No. PEDESTALES	ALTURA (cm)	No. PEDESTALES	ALTURA (cm)	No. PEDESTALES	ALTURA (cm)
1		6		11	
2		7		12	
3		8		13	
4		9		14	
5		10		15	



CANALILLO

O CARCAVA

☐

F

SECCIÓN TRANSVERSAL 1		SECCIÓN TRANSVERSAL 2	
MEDICIÓN	PROFUNDIDAD	MEDICIÓN	PROFUNDIDAD
1		1	
2		2	
3		3	
4		4	
5		5	
LONGITUD TOTAL O DEL TRAMO MEDIDO:			

Variables edáficas

Infiltración para una pulgada de agua							
1ra pulgada		1er.	w*	2da. Pulgada		2do.	w*
Hora inicio	Hora fin	Tiempo de infiltración (min)	1ra. Infiltración (in hr ⁻¹)	Hora inicio	Hora fin	Tiempo de infiltración (min)	2da. Infiltración (in hr ⁻¹)
*Conversión de tiempo de infiltración a pulgadas por hora (in hr ⁻¹); in hr ⁻¹ =(1/w)*60							
Notas:							
Densidad aparente							
Peso total del suelo extraído (gr)		Peso de la submuestra (gr)		Peso de suelo seco a 105°C (gr)		Volumen de agua utilizado (ml)	

Resistencia a la penetración			
Profundidad_Marcas	Psi(Libras/in ²)		
	1ra medición	2da medición	3ra medición
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
Nota:			

Profundidad del suelo (cm)	
1ra medición	
2da medición	
3ra medición	

6.3. CÓDIGO UTILIZADO PARA LAS VARIABLES EN LOS ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Código	Significado
pedes	Pedestales
pend	Pendiente
pp	Precipitación
bio1	Biomasa de la vegetación
bio2	Biomasa de la hojarasca
esph	Espesor de la hojarasca
bio3	Biomasa del mantillo
espman	Espesor del mantillo
basal	Área basal
hoja	Cobertura del dosel, hoja
veg	Cobertura del suelo, vegetación
resid	Cobertura del suelo, residuos
suelo	Cobertura del suelo, suelo expuesto
roca	Cobertura del suelo, roca
inf	Infiltración
compac	Compactación
prof	Profundidad del suelo
pH	Potencial hidrógeno
mo	Materia orgánica
agreg	Agregados estables en el suelo
da	Densidad aparente