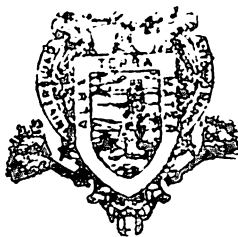


**EFEECTO DE LA REFORESTACION EN EL CONTROL
DE LA EROSION HIDRICA**

Universidad Autónoma Agraria
"ANTONIO NARRO"



CATARINA LOREDO OSTI

B I B L I O T E C A

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
EN SUELOS**



**Universidad Autónoma Agraria
Antonio Narro**

PROGRAMA DE GRADUADOS

**Buenavista, Saltillo, Coah.
DICIEMBRE 1994**

EFECTO DE LA REFORESTACION EN EL CONTROL
DE LA EROSION HIDRICA

CATARINA LOREDO OSTI

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
EN SUELOS

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
PROGRAMA DE GRADUADOS
BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MEXICO
DICIEMBRE DE 1994

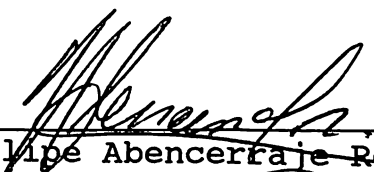
Tesis elaborada bajo la supervisión del comité particular
de asesoría y aprobada como requisito parcial, para optar
al grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

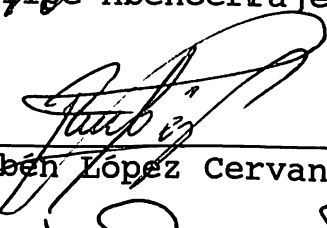
EN SUELOS

COMITE PARTICULAR

Asesor principal:


MC. Felipe Abencerraje Rodríguez

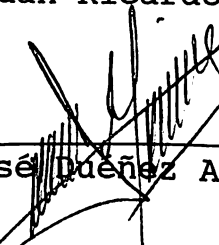
Asesor:


MC. Rubén López Cervantes

Asesor:


M.Sc. Juan Ricardo Reynaga Valdés

Asesor:


MC. José Duñez Alanís


Dr. Jesús M. Fuentes Rodríguez
Subdirector de Postgrado

Buenavista, Saltillo, Coahuila. Diciembre de 1994.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi agradecimiento a:

La Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por la oportunidad de continuar mi preparación profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca otorgada durante una parte de mis estudios, así como a la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos por el apoyo recibido.

Al M.C. Felipe Abencerraje R. por la asesoría y apoyo brindados para la realización y culminación de este trabajo.

Al M.C. Rubén López C. por su disposición para revisar este manuscrito y por sus sugerencias y aportaciones.

Al M.Sc. J. Ricardo Reynaga V. por la confianza que me brindó en el transcurso de mis estudios y por sus valiosas aportaciones que enriquecieron el desarrollo, análisis y presentación del presente trabajo.

Al M.C. José Duéñez A. por su amistad y por el apoyo incondicional que me brindó durante el trabajo de campo, en la integración de resultados y en la presentación final de este trabajo.

Al M.C. José Concepción Loredó Osti, por su valiosa participación en el análisis estadístico y por su apoyo en la integración de gráficas y cuadros.

Al M.C. Sergio Beltrán López por toda su paciencia y apoyo.

A la Srita. Myrna Rojo Sotelo por su disposición para realizar la revisión del presente escrito.

Finalmente agradezco al personal Académico y de Apoyo de la Especialidad de Suelos, en especial al Dr. Eduardo Narro F. así como a mis amigos Octavio Ruiz B. y Juan Manuel Cortés, por todos los momentos que convivimos en aulas y fuera de ellas.

DEDICATORIA

Con todo mi amor:

A SERGIO

compañero de mi vida y a nuestros hijos

SERGIO

CECILIA SARAHI

IVAN MANUEL

A mis padres:

GREGORIO Y CATARINA

COMPENDIO

EFECTO DE LA REFORESTACION EN EL CONTROL DE LA
EROSION HIDRICA

por

CATARINA LOREDO OSTI

MAESTRO EN CIENCIAS
ESPECIALISTA EN SUELOS

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MEXICO

DICIEMBRE, 1994

M.C. Felipe Abencerraje Rodríguez

-Asesor-

Palabras clave: Erosión; Reforestación; Erosionabilidad
del Suelo; Estabilidad de Agregados;
Infiltrabilidad.

El objetivo del presente estudio fue determinar el efecto de la reforestación en el control de la erosión hídrica. El trabajo se condujo en verano de 1992 en la Sierra Zapalinamé al Sur del Mpio. de Saltillo, Coah., en una reforestación de Pinus halepensis. Los sitios bajo

estudio fueron tres: reforestación de 31 años; reforestación de 19 años y un sitio sin reforestar que presentaba vegetación de pastizal. Se utilizó un simulador de lluvia, similar al descrito por Wilcox et al (1986), para aplicar durante treinta minutos una lluvia de 98.5 mm/hr de intensidad, sobre parcelas circulares de un metro de diámetro. La infiltrabilidad se estimó como la diferencia entre la lluvia aplicada y el escurrimiento en relación al tiempo. La pérdida de suelo se evaluó como erosión total, erosión inicial y erosión acumulada en relación al escurrimiento; también se analizó la tasa de erosión. La erosionabilidad y la estabilidad de la estructura fueron estimadas. Se midieron atributos de la vegetación y condiciones del suelo para conocer su relación con las variables en estudio.

Los resultados indican que la infiltrabilidad y el escurrimiento superficial no difieren estadísticamente entre sitios reforestados y no reforestados. La pérdida de suelo presenta diferencias significativas entre tratamientos; los dos sitios reforestados muestran pérdidas de suelo menores y son más eficientes en el control de la erosión hídrica que el sitio sin reforestar.

La erosionabilidad del suelo no mostró diferencia estadística entre sitios, sin embargo mostró una relación

alta con la infiltrabilidad, escurrimiento superficial y pérdida de suelo. La estabilidad de la estructura tuvo mejor índice de agregación en el sitio reforestado en 1961 y mostró diferencias significativas con los dos sitios restantes.

De las variables de suelo y vegetación, la erosionabilidad, la cubierta vegetal total, la cubierta del mantillo, la estabilidad de la estructura y la profundidad del suelo, fueron los factores mas relacionados con la infiltrabilidad. La erosión hídrica laminar se relacionó con la erosionabilidad del suelo, cobertura vegetal total, textura, cobertura del mantillo, velocidad de infiltración y estabilidad de la estructura.

ABSTRACT

EFFECTS OF REFORESTATION ON WATER EROSION CONTROL

By

CATARINA LOREDO OSTI

MASTER OF SCIENCE

SOILS

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MEXICO

DICIEMBRE 1994

M.C. Felipe Abencerraje R.

-Adviser-

Key Words: Forestation; Erosion Control; Infiltrability;
Soil Erodibility; Soil Aggregated; Pinus
halepensis

This trial was conducted on Zapaliname Reforested
site, Saltillo, Coahuila, Mexico in summer of 1992 with

the objective to determine the effect of reforestation on erosion control by analyzing infiltrability, soil loss, erodability and aggregated stability measures.

The studied sites were two reforested areas, 31 and 19 years old both with Pinus halepensis specie plus a non-reforested site. A rain simulator was used to apply 30 minutes of rain at 98.5 mm/hr intensity over one meter diameter circular plots. The infiltration rates were measured between the applied water and the runoff difference. The soil loss was measured by the sediment production in the runoff. The erodability was calculated by the Wischmeier and Smith Method. The aggregated stability was estimated as an aggregation index. The vegetation and soil attributes were measured to know their relationship with the studied variables.

The results showed no statistical differences between infiltrability and surface runoff in the reforested and non-reforested areas. The soil loss showed significant differences between the sites both initial and total measures. The two reforested sites showed less soil loss and controlled erosion more efficiently than the non-reforested vegetation site. The erodability didn't show statistical differences between sites, however a high relationship between infiltrability and runoff was showed. The aggregate stability had the best aggregation index at

the reforested site of 31 years.

Concerning soil and vegetation variables, the erodability, the vegetative cover, the litter, the aggregate stability and the soil depth showed high relationships with infiltrability. The erodability, vegetative cover, texture, litter cover, infiltrability and aggregate stability showed high relationships with the sediment production.

INDICE DE CONTENIDO

	PAGINA
INDICE DE CUADROS	xiv
INDICE DE FIGURAS	xvii
INTRODUCCION	1
Objetivo General	2
Objetivos Particulares	2
Hipótesis	3
REVISION DE LITERATURA	4
Generalidades	4
Concepto de Erosión	6
Factores que Afectan la Erosión	8
Precipitación	8
Suelo	11
Topografía	17
Vegetación	18
Manejo	24
Uso de Simuladores de Lluvia en	
Estudios de Erosión	28
MATERIALES Y METODOS	30
Descripción del Area de Estudio	30
Metodología	33

Simulación de Lluvia	34
Tratamientos y Unidades de Muestreo	36
Infiltrabilidad y Escurrimiento Superficial.	37
Estimación de la Erosión	38
Erosionabilidad del Suelo	39
Estabilidad de Agregados	41
Variables de la Vegetación	42
Análisis Estadístico	44
RESULTADOS	47
Infiltrabilidad y Escurrimiento Superficial.	47
Erosión	63
Tasa de Erosión	66
Erosión Total	72
Erosión inicial	79
Erosión Acumulada en Relación al Escurrimiento	85
Erosionabilidad del Suelo (K)	90
Estabilidad de Agregados	93
DISCUSION	95
Infiltrabilidad y Escurrimiento Superficial.	95
Erosión	98
Tasa de Erosión	98
Erosión Total	99
Erosión Inicial	101
Erosión Acumulada en Relación al Escurrimiento	103

Erosionabilidad	105
Estabilidad de Agregados	105
CONCLUSIONES	108
RESUMEN	110
LITERATURA CITADA	112
APENDICES	117

INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
2.1	Valores asignados a la estructura para su uso en el nomograma de erosionabilidad.....	14
2.2	Códigos de permeabilidad para su uso en el nomograma de erosionabilidad.....	16
4.1	Valores de infiltrabilidad, porcentaje de agua infiltrada y coeficiente de determinación R^2 para el modelo $I = \alpha t + \epsilon$...	48
4.2	Modelo ajustado para la infiltrabilidad $V = \alpha + \beta m + \delta r + \tau d + fg + \epsilon$	53
4.3	Valor de F y medias observadas para la infiltrabilidad (cm/hr).....	55
4.4	Lámina infiltrada a través del tiempo.....	56
4.5	Modelo ajustado para el escurrimiento (cm) $L = \alpha + \beta r + \tau m + \delta d + fg + \epsilon$	61
4.6	Valor de F y medias observadas para la lámina de escurrimiento	63
4.7	Erosión laminar hídrica (kg/ha) a través del tiempo (min)	64
4.8	Valores de la tasa de erosión, erosión total y coeficiente de determinación para el modelo $S = \phi t + \epsilon$	66
4.9	Modelo ajustado para la tasa de erosión $TE = \alpha + \beta d + \tau a + \delta n + \epsilon$	71
4.10	Tasa de erosión (kg/ha/min)	72
4.11	Valor de F y medias observadas para la tasa de erosión (kg/ha/min)	72
4.12	Modelo ajustado para la erosión total en los sitios donde hubo escurrimiento $PS = \alpha + \beta d + \tau n + \epsilon$	78

4.13	Valor de F y medias observadas para la erosión total (kg/ha)	79
4.14	Modelo ajustado para erosión inicial en relación a lámina de escurrimiento (kg/ha/cm) $EI = \alpha + \beta n + \epsilon$	81
4.15	Tasa de erosión inicial en relación a la lámina de escurrimiento (kg/ha/cm)	85
4.16	Valor de Fc y medias observadas para erosión inicial (kg/ha/cm)	85
4.17	Erosión acumulada por lámina de escurrimiento (kg/ha/cm) a través del tiempo	86
4.18	Modelo ajustado para la erosión acumulada por lámina de escurrimiento (kg/ha/cm) $EA = \alpha + \beta d + \tau n + \epsilon$	89
4.19	Erosión acumulada por lámina de escurrimiento (kg/ha/cm)	90
4.20	Valor de Fc y medias observadas para la erosión acumulada en relación al escurrimiento (kg/ha/cm)	90
4.21	Valor de los coeficientes de la recta para la relación entre erosionabilidad y las variables dependientes	91
4.22	Valores de erosionabilidad del suelo (100K)..	93
4.23	Valor de F y medias observadas para el factor erosionabilidad del suelo (K)	93
4.24	Indice de agregación del suelo (DMG) en la Reforestación Zapalinamé	94
4.25	Valor de Fc y medias observadas para el Indice de Agregación en la Reforestación Zapalinamé	94
A.1	Cálculo de la erosividad de la lluvia	118
A.2	Ejemplo de forma de registro y cálculo para obtener infiltrabilidad	119
A.3	Ejemplo del cálculo de la estabilidad de agregados utilizando el diámetro medio geométrico como índice de agregación	120

A.4	Valores de los parámetros para determinar erosionabilidad del suelo utilizando la ecuación de Wischmeier y Smith (1978)	121
B.1	Matriz de correlación lineal simple entre las principales variables estudiadas	123
B.2	Análisis de varianza del modelo para infiltrabilidad.....	124
B.3	Análisis de varianza del modelo para la lámina de escurrimiento	124
B.4	Análisis de varianza del modelo para la tasa de erosión	124
B.5	Análisis de varianza del modelo de erosión total en los sitios donde hubo escurrimiento.	124
B.6	Análisis de varianza del modelo para la erosión inicial	125
B.7	Análisis de varianza para el modelo de erosión acumulada en relación al escurrimiento.....	125
B.8	Análisis de varianza para la infiltrabilidad	125
B.9	Análisis de varianza para la lámina de escurrimiento	125
B.10	Análisis de varianza para la tasa de erosión.	126
B.11	Análisis de varianza para la erosión total en los sitios donde hubo escurrimiento	126
B.12	Análisis de varianza para erosión inicial....	126
B.13	Análisis de varianza para erosión acumulada en relación al escurrimiento.....	126
B.14	Análisis de varianza para el factor erosionabilidad.....	126
B.15	Análisis de varianza para la estabilidad de agregados	127
B.16	Prueba de medias para la erosión inicial.....	127
B.17	Prueba de medias para erosión total.....	127
B.18	Prueba de medias para la erosión acumulada en relación al escurrimiento.....	127

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
2.1	Factor R estimado para la República Mexicana (Cortés, 1991).....	10
2.2	Nomograma para la determinación del valor K (Wischmeier <u>et al.</u> 1971, modificado por Foster <u>et al.</u> 1981).....	15
3.1	Ubicación de los sitios de estudio	31
3.2	Esquema del simulador de lluvia	34
4.1	Relación entre infiltrabilidad y suelo desnudo en la Reforestación Zapalinamé.....	49
4.2	Relación entre infiltrabilidad y cobertura de mantillo orgánico en la Reforestación Zapalinamé	50
4.3	Relación entre infiltrabilidad y estabilidad de agregados en la Reforestación Zapalinamé	51
4.4	Relación entre infiltrabilidad y profundidad del suelo en la Reforestación Zapalinamé	52
4.5	Infiltrabilidad a través del tiempo en la Reforestación Zapalinamé	54
4.6	Infiltrabilidad acumulada a través del tiempo	57
4.7	Relación entre lámina de escurrimiento y suelo desnudo en la Reforestación Zapalinamé	58
4.8	Relación entre lámina de escurrimiento y cubierta de mantillo en la Reforestación Zapalinamé	59
4.9	Relación entre lámina de escurrimiento y suelo cubierto con gramíneas en la Reforestación Zapalinamé	60

4.10	Lámina de escurrimiento acumulada a través del tiempo	62
4.11	Erosión acumulada a través del tiempo	65
4.12	Relación entre tasa de erosión y cobertura vegetal en la Reforestación Zapalinamé	67
4.13	Relación entre tasa de erosión e infiltrabilidad en la Reforestación Zapalinamé	68
4.14	Relación entre tasa de erosión y cubierta de mantillo en la Reforestación zapalinamé.	69
4.15	Relación entre infiltrabilidad y estabilidad de agregados en la Reforestación Zapalinamé	70
4.16	Relación entre erosión y el contenido de arenas gruesas en la Reforestación Zapalinamé.....	73
4.17	Relación entre erosión y cubierta vegetal en la Reforestación zapalinamé	74
4.18	Relación entre erosión e infiltrabilidad en la Reforestación Zapalinamé	75
4.19	Relación entre erosión y cubierta de mantillo en la Reforestación Zapalinamé ...	76
4.20	Relación entre erosión y estabilidad de agregados en la reforestación Zapalinamé ..	77
4.21	Erosión hídrica laminar media a través del tiempo en la Reforestación Zapalinamé.....	80
4.22	Relación entre erosión inicial e infiltrabilidad en la Reforestación Zapalinamé	82
4.23	Relación entre erosión inicial y cubierta de mantillo en la Reforestación Zapalinamé.	83
4.24	Relación entre erosión inicial y arenas gruesas en la Reforestación Zapalinamé	86
4.25	Erosión acumulada por lámina de escurrimiento.....	87

4.26	Erosión acumulada en relación al escurrimiento a través del tiempo en la Reforestación Zapalinamé	88
4.27	Relación entre erosionabilidad y pérdida de suelo en la Reforestación Zapalinamé	92

INTRODUCCION

En las últimas décadas los problemas de erosión se han incrementado considerablemente, como resultado del manejo inadecuado del suelo y vegetación. De acuerdo al Inventario Nacional de Tierras Erosionadas (SARH, 1986) se estima que el 81 por ciento del territorio de nuestro país, presenta algún grado de erosión manifiesta que varía de leve a muy severa.

La degradación del suelo no es un fenómeno reciente; este proceso se aceleró considerablemente, después de la llegada de los españoles, ya que los colonizadores introdujeron cambios en la planificación de los esquemas de producción, con modificaciones profundas en la utilización de los recursos naturales. Uno de los ecosistemas más afectados ha sido el bosque, que al perder la cubierta vegetal, permite que la superficie desnuda del suelo quede expuesta a la acción de los agentes erosivos, propiciando la degradación del recurso.

Aún y cuando los problemas de erosión no son nuevos, la investigación en conservación de suelos en México es reciente y generalmente se ha enfocado a las áreas agrícolas, estudiando el control de la erosión mediante prácticas mecánicas y manejo de cultivos. La

información sobre degradación del suelo en áreas de bosque, pastizal o matorral de las zonas semiáridas del país, es escasa y existe poco conocimiento sobre las medidas adecuadas para el manejo sostenido de estos ecosistemas.

La reforestación es una práctica vegetativa que generalmente se asocia a una reducción en las pérdidas de suelo en tierras de aptitud forestal, sin embargo, existen pocas investigaciones que indiquen en qué grado y bajo qué condiciones se logra el control satisfactorio de la erosión.

Objetivo General

Determinar el efecto de la reforestación en el control de la erosión hídrica en la Sierra Zapalinamé, Coahuila.

Objetivos Particulares

1. Evaluar el efecto de la reforestación sobre la infiltrabilidad y el escurrimiento superficial.
2. Evaluar el efecto de la reforestación en la erosión laminar.
3. Analizar el efecto de la reforestación en la erosionalidad del suelo.

4. Estimar cambios en la estabilidad de agregados del suelo debidos a la reforestación.

Hipótesis

- H1. La reforestación incrementa significativamente la infiltrabilidad y reduce el escurrimiento superficial.
- H2. La reforestación reduce significativamente las pérdidas de suelo.
- H3. La reforestación reduce significativamente la erosionabilidad del suelo.
- H4. La reforestación incrementa la estabilidad de agregados.

REVISION DE LITERATURA

Generalidades

En el sur del municipio de Saltillo, en terrenos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, localizados en la Sierra Zapalinamé, se lleva a cabo desde 1960 un programa de reforestación. La presencia de relictos y la opinión de campesinos originarios de la zona, indican que el lugar anteriormente estuvo cubierto de masas boscosas, con predominancia de Pinus cembroides. Estas masas fueron desapareciendo con el tiempo, debido a la sobreutilización del recurso y a un pastoreo excesivo, originando altos grados de erosión (Oviedo, 1980)

Para contrarrestar lo anterior, la alternativa de recuperación que se consideró pertinente, fue la introducción de especies forestales, con el objetivo inicial de reducir la erosión y promover la recarga de los mantos acuíferos; posteriormente se continuó con las actividades de reforestación aprovechando los escurrimientos a través de zanjas y bordos a nivel. De las especies plantadas, la que ha mostrado mejor desarrollo es el pino alepo (Pinus halepensis) (Mathus y Castañeda, 1978).

El pino alepo se encuentra distribuido en la

cuenca del Mediterráneo, en regiones con precipitación de 250 a 800 mm anuales; crece bien sobre suelos con alto contenido de carbonatos libres; no prospera en suelos pesados arcillosos, con drenaje deficiente; se desarrolla en suelos someros de baja productividad, donde los árboles de pino alepo son usualmente de forma pobre, con tallos torcidos, ramas largas y copas anchas. En buenos sitios, los árboles crecen erectos con copas angostas (Panetsos, 1981).

La reforestación es la actividad de establecer una comunidad de árboles en áreas que ya habían sido forestales y que perdieron parcial o totalmente su cubierta. Las acciones de reforestación obedecen a un proceso natural o artificial, mediante el cual se establece una nueva masa arbolada o bien se reestablece parte o toda esa masa (SARH, 1977). Entre los objetivos de las reforestaciones podemos mencionar: aprovechamiento forestal, regulación de escurrimientos superficiales, cortinas rompevientos, o bien, para control de la erosión hídrica.

Bajo este último objetivo, se han realizado diversas reforestaciones en los estados de Tlaxcala, Hidalgo, México y la reforestación de la Sierra Zapalinamé en Coahuila, motivo del presente estudio.

Concepto de Erosión

La erosión es el proceso físico que consiste en el desprendimiento, transporte y depositación de las partículas del suelo (Kirkby, 1984); si este proceso se lleva a cabo en condiciones naturales, se denomina erosión geológica, pudiendo ser considerada en tal caso, como una forma más de conformación del relieve. Si la erosión se incrementa por las actividades humanas, se manifiesta la erosión acelerada o inducida, que se presenta al manipular la capa arable y cobertura vegetal, al promover la sobreutilización de los pastizales o al deforestar áreas arboladas o de arbustos.

De acuerdo al agente erosionante se diferencian dos tipos de erosión: hídrica y eólica. La erosión hídrica ocurre cuando la cantidad del agua de lluvia que entra al suelo, es menor al agua precipitada, de tal forma que se produce un flujo superficial del agua sobre el terreno. Este flujo puede acarrear materiales del suelo, en función de su fuerza hidráulica. Conforme aumenta la carga hidráulica que fluye sobre la superficie, se ejercen fuerzas mayores y la erosión del suelo puede ocurrir aún en pendientes suaves; estas condiciones son comunmente encontradas en las zonas semiáridas. La erosión severa que se asocia con la formación de cárcavas, puede iniciar movimientos de masas en las pendientes abruptas de las paredes de los canales, que son importantes en la remoción

total de sedimentos (Figueroa, 1991). Las formas más comunes de erosión hídrica son: erosión por salpicamiento; erosión laminar y en canalillos; y erosión en cárcavas. Las pérdidas de suelo involucran pérdidas de nutrimentos, que reducen la capacidad productiva del recurso; la materia orgánica y la fracción húmica también se pierden continuamente (Martínez, 1983). Al evaluar pérdidas de suelo es común referirlas a las siguientes expresiones:

Producción de sedimentos: Es el flujo total de sedimentos de una cuenca hidrológica o de una área sujeta a evaluación durante un tiempo determinado (Kirkby y Morgan, 1984); no toda la pérdida de suelo se deposita en el sistema de corrientes (una parte se deposita en depresiones de la misma cuenca). Por lo anterior, el material que se transporta hacia un punto de interés es la producción de sedimentos.

Tasa de erosión: Es la pérdida de suelo de una área dada en un tiempo determinado. Se expresa usualmente en unidades de volumen o peso ($\text{kg/m}^2/\text{año}$, ton/ha/año ó cm/ha/año o ton/ha/cm de lámina de escurrimiento).

Cuando las áreas estudiadas son pequeñas, la tasa de erosión, la pérdida de suelo y la producción de sedimentos son equiparables, es decir, la tasa de entrega de sedimentos es unitaria (Figueroa, 1991) y reflejan la erosión del suelo.

Factores que Afectan la Erosión

Al referirnos a la erosión hídrica, los factores pueden conjuntarse en dos grupos: uno considera el factor energía, representado por la precipitación, el escurrimiento y la pendiente; el otro grupo incluye el factor resistencia, representado por la erosionabilidad del suelo, la cobertura vegetal y manejo del terreno (Figueroa, 1991).

La erosión hídrica es el tipo dominante en las tierras forestales; Wischmeier y Smith (1978) indican que los principales factores asociados a este proceso son la precipitación, el suelo, la topografía, la cubierta vegetal y el manejo del terreno.

Precipitación

La precipitación es el factor climático que más influye en la erosión hídrica; las características de la precipitación que se relacionan con el proceso erosivo son: cantidad, intensidad y duración de la lluvia; tamaño, forma, velocidad terminal y energía cinética de las gotas de lluvia (Hudson, 1977; Kirkby y Morgan, 1984).

A la habilidad de la lluvia y el escurrimiento para producir erosión se le denomina erosividad, la cual representa la energía necesaria para disgregar, dispersar y transportar las partículas de suelo. Las gotas de lluvia

al impactar con la superficie del terreno, rompen los agregados del suelo y ponen en suspensión el material fino, produciendo una ligera compactación; la capa compactada reduce la infiltrabilidad; cuando ésta es excedida por la precipitación, se inicia el escurrimiento superficial.

El impacto de las gotas de lluvia tiene alta capacidad de disgregación y baja capacidad de transporte de las partículas de suelo; el escurrimiento con baja capacidad para desprender dichas partículas, tiene alta capacidad para transportarlas. Wischmeier y Smith (1965) reportan que el mejor estimador de la erosividad es el EI30, el cual se obtiene con la siguiente ecuación:

$$EI30 = (E)(I30)$$

Donde:

$EI30$ = Índice de erosividad para un evento
 (MJ mm / ha hr)

E = Energía cinética de la lluvia (MJ/ha)

$I30$ = Intensidad máxima en 30 minutos
 continuos de lluvia (mm/hr)

Con la suma de los EI30 de cada uno de los eventos del año, se obtiene el índice de erosividad anual (R). Dicho índice fué evaluado en la República Mexicana (Cortés, 1991) y su valor varía de 800 a 16,800 MJmm/hahraño (Figura 2.1).

EI30 ANUAL

SIMBOLOGIA

804.9	3872.6
854.9	4941.1
963.5	6366.8
1715.2	9096.1
1946.2	12995.1
3001.6	16551.5
3302.1	16807.5

EI30= INDICE DE EROSIVIDAD

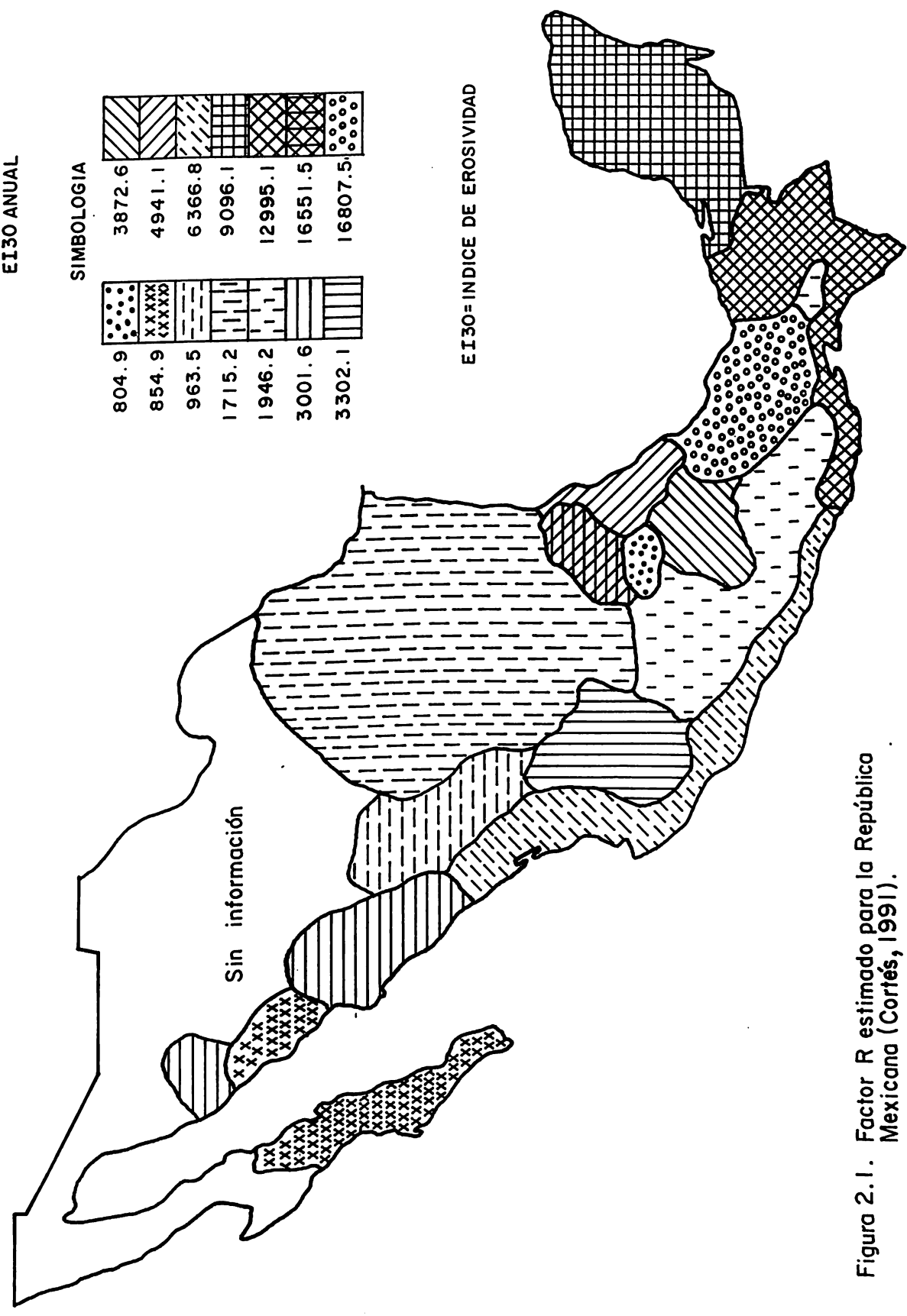


Figura 2.1. Factor R estimado para la República Mexicana (Cortés, 1991).

Suelo

El suelo es un sistema heterogéneo, polifásico, poroso, consistente de partículas muy pequeñas e independientes; el arreglo de las partículas determina las características del espacio poroso, en el cual se transmiten o retienen agua, aire y calor (Figueroa, 1991).

La erosionabilidad del suelo es la susceptibilidad que éste presenta a la erosión; a mayor erosionabilidad, menor resistencia a la acción de los agentes erosivos (Wischmeier et al. 1971). Las propiedades del suelo que afectan la erosionabilidad pueden agruparse en dos categorías (Wischmeier y Smith, 1965; Beasley, 1972): las que afectan la infiltrabilidad, la permeabilidad del perfil y la capacidad de almacenamiento, así como las que influyen en la resistencia a la dispersión y al transporte durante la lluvia y el escurrimiento.

El primer grupo incluye el contenido de humedad del suelo al inicio de la lluvia y las propiedades que afectan la porosidad en la superficie y perfil del suelo. La segunda categoría comprende la textura, el contenido de agregados estables al agua, el grado de desarrollo de la estructura asociado al contenido de materia orgánica, material formador del suelo y presencia de cementantes químicos. Ya que la materia orgánica se concentra cerca de la superficie del suelo, es más susceptible a ser

erosionada durante las primeras etapas del fenómeno erosivo.

Es difícil separar el efecto individual de estas propiedades sobre la erosionabilidad, ya que éllas se relacionan e interactúan entre sí; sin embargo, la textura se considera un buen indicador de la erosionabilidad (Morgan, 1979).

Los suelos arenosos poseen alta infiltrabilidad y sólo se espera escurrimiento cuando las lluvias son intensas; si esto ocurre, la velocidad del flujo debe ser alta para mover las partículas. El suelo arcilloso tiene baja infiltrabilidad, originando mayor escurrimiento superficial, sin embargo, la alta cohesión entre partículas, dificulta la acción desintegradora del escurrimiento (Suárez, 1979).

Además del tamaño de partículas, el arreglo de estas en partículas secundarias (agregados) y su estabilidad al agua, determinan la cantidad, tamaño y arreglo de los poros que influyen en la infiltrabilidad y permeabilidad. Si los agregados son resistentes al efecto dispersivo del agua, es posible mantener una estructura porosa; esto es importante en la superficie del terreno, en donde los efectos combinados de absorción de agua y el impacto de las gotas de lluvia, pueden causar un rompimiento y traslocación de los agregados a material

fino (Douglas y Goss, 1982).

La densidad aparente es otro indicador de la erosionabilidad del suelo (Young y Mutchler, 1977); su valor se reduce al aumentar el contenido de materia orgánica (Narro, 1987). Los suelos forestales generalmente tienen densidades aparentes menores o cercanas a la unidad y presentan agregados estables que mantienen un espacio poroso mayor. La mayoría de los bosques en buenas condiciones presentan infiltrabilidad alta y reducen el escurrimiento y erosión del suelo (Castín y Dooge, 1973). Un cambio en la infiltrabilidad debe esperarse, mientras la plantación de árboles se encuentra madurando; estos cambios dependen de la cobertura vegetal y de las condiciones del suelo en el momento de realizar la reforestación; una plantación realizada en un suelo desnudo erosionable, puede incrementar la infiltrabilidad en sólo 10 años, hasta un punto que no se produzca escurrimiento superficial ni erosión (Ursic y Dendy, 1965).

Wischmeier et al. (1971) propusieron una ecuación para determinar el valor de la erosionabilidad, que involucra los siguientes parámetros: porcentaje de limo más arena muy fina (partículas de 0.002 a 0.1 milímetros de diámetro), porcentaje de arena gruesa (0.1 a 2.0 mm), contenido de materia orgánica (porciento), estructura y permeabilidad. Los valores de los primeros cuatro

parámetros son valores promedio para los primeros 20 centímetros; el valor de la permeabilidad es estimado en todo el perfil del suelo.

Los mismos autores proporcionan la solución gráfica a la ecuación, la cual fué modificada por Foster et al. (1981) para su uso en unidades del Sistema Métrico Internacional (Figura 2.2) donde se puede observar que la variación en la estructura se expresa con un código que varía de 1 a 4 y el código de permeabilidad varía de 1 a 6. Los valores asignados a estas dos propiedades físicas, se presentan en los cuadros 2.1 y 2.2.

Cuadro 2.1. Código asignado a la estructura para su uso en el nomograma de erosionabilidad (Wischmeier y Smith, 1978)

CODIGO	CLASE DE ESTRUCTURA	TAMAÑO (mm)
1	Granular muy fina y grumosa muy fina	< 1
2	Granular fina y grumosa fina	1 - 2
3	Granular media, grumosa media y granular gruesa	2 -10
4	Laminar, prismática, columnar, masiva, bloques y granular muy gruesa	> 10

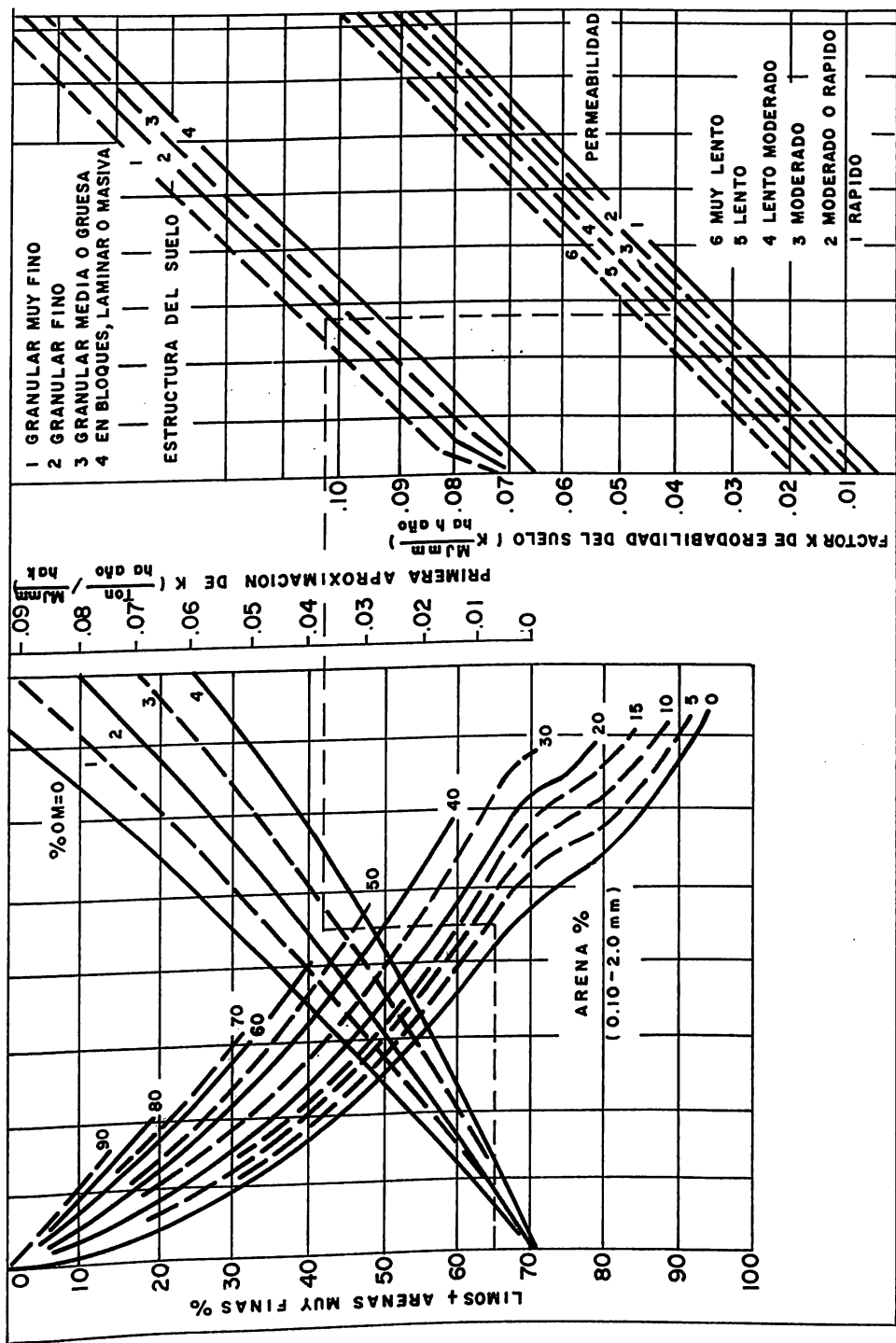


Figura 2.2. Nomograma para la determinación del valor de K (Wischmeier et al. 1971 modificado por Foster et al. 1981).

Cuadro 2.2. Código de permeabilidad para su uso en el nomograma de erosionabilidad (Wischmeier y Smith, 1978)

CODIGO	CLASIFICACION	PERMEABILIDAD cm/hr
1	Muy rápida	> 12.5
2	Moderadamente rápida	6.0 - 12.5
3	Moderada	2.0 - 6.0
4	Moderadamente lenta	0.5 - 2.0
5	Lenta	0.125 - 0.5
6	Muy lenta	< 0.125

La expresión numérica de la ecuación es:

$$100K = 2.1 \times 10^{-4} (12 - a) M^{1.14} + 3.25(b-2) + 2.5(c-3)$$

En donde:

- K = Factor de erosionabilidad del suelo
- a = Porciento de materia orgánica
- b = Código de estructura del suelo
- c = Código de permeabilidad del perfil
- M = (Porciento de limos más arenas muy finas)(100 menos porciento de arcilla)

Se han propuesto otros índices para erosionabilidad, tales como el Índice Australiano (Lindsay y Gumbs, 1982), que relaciona la textura, estructura y estabilidad de agregados con un factor de transmisión de

agua, que es a su vez una función de la raíz cuadrada de la infiltrabilidad, permeabilidad horizontal y capacidad de retención de humedad.

Con el uso del nomograma se determina el valor promedio anual de erosionabilidad, sin embargo este factor presenta variaciones estacionales a través del año (Coote et al. 1988) y su valor declina a través del tiempo en el caso de reforestaciones, por el retiro de la labranza y la reconsolidación del suelo (Dissmeyer y Foster, 1981).

Topografía

Las características del relieve tales como longitud y grado de la pendiente son factores importantes asociados al escurrimiento superficial. Uno de los primeros estudios sobre estos factores fue realizado por Zingg (1940) quien resumió información de diversas parcelas evaluadas bajo condiciones de lluvia artificial y natural. La longitud de la pendiente es la distancia del punto de origen del escurrimiento superficial al punto donde cambia el grado de la pendiente; la acumulación del volumen escurrido a lo largo de la pendiente incrementa la capacidad de desprendimiento y transporte del flujo superficial (Wischmeier y Smith, 1978).

En las tierras forestales el grado y longitud de la pendiente de los cauces afectan considerablemente la velocidad del escurrimiento que en ellos se realiza; la

pérdida de suelo en las cárcavas o canales, debidas al movimiento de masas, es una de las formas dominantes de erosión en los bosques bajo aprovechamiento (Ursic y Dendy, 1965).

Vegetación

La cobertura vegetal tiene efectos benéficos en la reducción de las pérdidas de suelo, ya que le brinda protección contra la acción de los agentes erosivos. En base al grado de protección durante el año, las coberturas vegetales pueden ser temporales o permanentes; las primeras incluyen las áreas dedicadas a la actividad agrícola en donde las plantas cultivadas protegen al suelo sólo una temporada o dos al año, dependiendo del grado de desarrollo del cultivo. Las coberturas permanentes consideran los usos del suelo forestal, pastizal, matorral, etc. y son aquéllas donde el suelo está protegido la mayor parte del año por una vegetación en desarrollo, cuya cobertura es mayor del 40 por ciento y el suelo no sufre alteraciones por implementos agrícolas en la capa arable, al menos en un período de tres años (Ríos, 1987).

Los bosques son considerados las coberturas más eficientes en la reducción de la erosión, sin embargo, una adecuada cobertura de pastizales puede tener efectos similares a los que se presentan en condiciones de bosque. Los escurrimientos superficiales y pérdidas de suelo

procedentes de buenos pastizales o de bosques, son pequeños y representan del uno al cinco porciento de las pérdidas generadas en suelos sin vegetación (Kirkby y Morgan, 1984).

En término de coberturas vegetales quedan incluídos los residuos orgánicos; tal es el caso del mantillo en los suelos de bosque y pastizal o de los residuos de cosecha en los terrenos agrícolas.

Las coberturas vegetales reducen la erosión hídrica en tres formas principales: 1) A través del efecto de protección al suelo contra el impacto de las gotas de lluvia; 2) Por los efectos en la erosionabilidad del suelo; se mejora la estructura y la porosidad en la superficie y perfil del suelo; y 3) Por el incremento en la rugosidad superficial que aumenta la fricción y disminuye la velocidad del escurrimiento (Wischmeier y Smith, 1965; Hudson, 1977; Figueroa, 1975; Ríos, 1987).

Actualmente, se considera que las coberturas vegetales son la mejor herramienta para reducir y controlar la erosión. La protección al suelo incluye la intercepción, dispersión y evaporación de las gotas de lluvia, que no alcanzan a llegar al suelo; la disminución en la velocidad terminal de las gotas de lluvia que son interceptadas y la lluvia que cae directamente del

follaje, sin la velocidad erosiva inicial.

Wischmeier y Smith (1965), reportaron que la energía cinética de la lluvia se disipa cuando las gotas se impactan sobre el follaje de la vegetación, sin embargo, existen aún diferentes opiniones en el caso de la cubierta forestal, sobre la erosividad de las gotas que caen directamente del follaje de los árboles, debido al tamaño que alcanzan al unirse cuando aún están sobre el follaje, así como a la velocidad terminal que alcanzan y que depende de la altura de la caída y de las características de la gota (Dissmeyer y Foster, 1981).

Anderson y Pyatt, (1986) evaluaron por tres años la capacidad de intercepción de plantaciones adyacentes de pinabete y pino con una edad promedio de 25 años y una plantación de pinabete de 63 años relativamente disperso. En los árboles jóvenes, la proporción de precipitación que llegó al suelo como flujo de tallo y precipitación libre, fué de 0.18 y 0.82 respectivamente. En el caso de pinabete maduro, dicha proporción fué de 0.02 y 0.98 en el mismo orden. De la precipitación total, las pérdidas netas por evapotranspiración directa del agua interceptada, fueron de 29 por ciento para ambas especies; concluyen que la capacidad de intercepción varía en función de la especie y de las condiciones de la plantación.

El porcentaje de la precipitación que se pierde

por la intercepción- evaporación directa del follaje, disminuye cuando la cantidad de precipitación se incrementa (Wisler y Brater, 1959); ellos reportan que en una lluvia de 6.3 mm en un bosque denso, el 80 por ciento fué interceptada y evaporada directamente de la superficie, sin que se hubiese presentado el flujo de tallo o precipitación libre; sin embargo, cuando la lluvia fué de 24.5 mm se interceptó sólo el 30 por ciento y un 70 por ciento llegó al suelo como flujo de tallo, flujo a través de la copa y precipitación directa.

Lo anterior nos indica que la cubierta vegetal tiene una capacidad límite de intercepción, que puede variar en función de las características de la especie, de la cantidad e intensidad de la lluvia al momento del evento, influyendo también la densidad de árboles por hectárea y la vegetación asociada a la comunidad forestal.

En los bosques, existen normalmente tres estratos vegetativos: el primero formado por las copas de los árboles; el estrato secundario formado por arbustos, pastos y hierbas; y un tercer estrato formado por el mantillo (hojarasca y residuos de plantas y animales parcialmente descompuestos) y la microflora.

Los últimos dos estratos, además de reducir la capacidad erosiva de la lluvia, incrementan la rugosidad

superficial que retarda el escurrimiento; la cubierta vegetal reduce la cantidad de suelo sellado por partículas finas e incrementa la rugosidad hidráulica, lo cual permite que el agua sea mantenida en la superficie del suelo por mas tiempo (Meewing y Packer, 1976).

Otro efecto de la vegetación en el control de la erosión se debe a la fuerza sujetadora del sistema radical sobre las partículas en el perfil del suelo, lo cual es favorecido por la descomposición de las raíces, que dejan cavidades que mejoran el movimiento del aire y el agua en el suelo (Ríos, 1987)

La combinación de una adecuada porosidad y rugosidad superficial, influyen profundamente en el movimiento libre del agua hacia dentro del perfil del suelo y la infiltrabilidad puede ser incrementada con prácticas culturales que promuevan la formación de pequeñas depresiones y rugosidad en la superficie (Dixon, 1971).

La eficiencia de la vegetación para reducir la erosión depende de la altura y continuidad de la cubierta vegetal, de la densidad de la cobertura en el suelo y de la densidad de raíces; el control satisfactorio de la erosión se alcanza cuando se tiene mas del 70 porciento de cobertura vegetal (Figueroa, 1991).

En las zonas semiáridas, la tasa de erosión que se

presenta en el matorral micrófilo y en pastizal amacollado es mayor que la que se presenta en un pastizal mediano abierto y las variables que tienen mayor influencia en la reducción de la erosión son la cobertura basal de zacates, la fitomasa aérea y la fitomasa de mantillo (Beltrán, 1988).

Zárate (1988) observó que en tres unidades de suelo diferentes que sustentaban el mismo tipo de vegetación (pastizal mediano abierto) la erosión no manifestó diferencias estadísticas; En ambos estudios se encontró que la cobertura vegetal influye en mayor grado en la erosión si se compara con el efecto del suelo, bajo condiciones semiáridas.

En un estudio realizado al Suroeste de Arizona, se analizaron tres complejos comunes de vegetación para cuantificar las diferencias en infiltrabilidad con tres tipos de suelo que sustentaban vegetación de arbustos, zacates y suelo sin vegetación; los suelos de textura fina presentaron menor infiltrabilidad; en relación a la cubierta vegetal, los sitios con arbustos tuvieron mayor infiltrabilidad que los sitios con cobertura de zacates y suelo desnudo; lo anterior fue atribuido a la cobertura de la corona de los arbustos que fue aproximadamente el doble de la cubierta de zacates y a la acumulación de mantillo orgánico bajo los arbustos que contribuyó al desarrollo de una capa superficial altamente permeable (Tromble et

al. 1979). En las zonas forestales, las características de la infiltrabilidad del horizonte Ao, determinan inmediatamente la cantidad de agua que puede entrar en un suelo forestal; también influyen las propiedades físicas de la superficie mineral y muchas de estas propiedades son respuesta a la cantidad de material vegetativo vivo o muerto presente en el área (Singh, 1970).

Williams et al. (1969) estudiaron el efecto del cambio de uso del suelo de una comunidad de pino-junípero a pastizal e indican que no detectaron un cambio drástico en la infiltrabilidad o en la producción de sedimentos; de 14 sitios estudiados, dos presentaron incremento en la infiltrabilidad y en dos disminuyó; los restantes no mostraron diferencias. En relación a la erosión, dos sitios tuvieron menor producción de sedimentos en las áreas tratadas y en los doce restantes fue similar.

El efecto integrado de la vegetación sobre el control de la erosión en áreas forestales, no puede ser separado de sus interrelaciones con el suelo.

Manejo

La erosión superficial normal, ocurre a un ritmo muy lento en zonas forestales y generalmente no es un problema ni siquiera en las zonas mas montañosas. Las pérdidas de suelo superficial en plantaciones de pino son

mínimas y rara vez exceden a los 100 kg/año (Megahan, 1972); sin embargo, la perturbación del suelo por la labranza del terreno, previa a la reforestación puede producir movimientos del suelo y una subsecuente sedimentación cuesta abajo, salvo que se trate de un terreno relativamente plano (Pritchett, 1986).

En relación a las actividades de labranza previas a la reforestación, existe discrepancia sobre su efecto en la infiltrabilidad y en la erosión del suelo. Dissmeyer y Foster (1981) señalan que la vegetación es más eficiente para reducir las pérdidas de suelo a medida que transcurre más tiempo de las operaciones de labranza, debido a la reconsolidación del suelo; sin embargo, Gutiérrez y Salazar (1986) encontraron que la infiltrabilidad en plantaciones de 9 y 14 años de edad, eran menores que las encontradas en una plantación de cinco años y atribuyeron sus resultados al disturbio causado al suelo en el momento de preparar el terreno. Dueñez (1988) obtuvo resultados similares, sin embargo, en ambas investigaciones al comparar la infiltrabilidad en áreas reforestadas con las no reforestadas, si se observó diferencia, siendo más bajas en las áreas sin reforestar. Al respecto, Ursic y Dendy (1965) señalan que en las zonas reforestadas la mayor parte de los sedimentos provienen de canales creados durante las operaciones previas de labranza.

Otra actividad de manejo en las reforestaciones son los aclareos; Hewlett y Doss (1984) evaluaron el efecto del aclareo y regeneración de pino y encontraron que las tasas de escurrimiento superficial que siguieron inmediatamente después de estas operaciones, se incrementaron de un 30 a un 45 por ciento, resultando un 55 por ciento anual de incremento en la erosividad del flujo del escurrimiento durante los cuatro años del ciclo de la cosecha, preparación del sitio y plantación mecánica. El incremento en la erosión se debió al disturbio del suelo relacionado con la magnitud de las lluvias; concluyen que los manejadores de bosques deben rediseñar y seleccionar los métodos de regeneración y mantenimiento para favorecer la protección de las zonas donde se realicen aclareos.

Patric et al. (1984) analizaron 812 mediciones de erosión en suelos forestales y estimaron la producción de sedimentos en las cárcavas de terrenos de bosque. Ellos indican que las ecuaciones para predecir pérdidas de suelo deben ser cuestionadas si sus estimaciones exceden de 0.62 ton/ha/año para las cuencas forestales de Estados Unidos y señalan que el uso del suelo afecta en mayor grado la erosión si se compara el efecto de otros factores solos; aún teniendo gran diversidad de tipos de bosques, geología, clima y fisiografía, las cuencas forestadas tienen menor pérdida de suelo que aquellas áreas usadas con fines no forestales.

En relación al uso múltiple, Blackburn et al (1990) estimaron el efecto de la extracción de madera, preparación mecánica del sitio y pastoreo moderado continuo, sobre el flujo superficial, la tasa de descarga y la producción de sedimentos e indican que en terrenos con 8 por ciento de pendiente o menos, existe mayor erosión cuando se realiza manejo intensivo, que en las cuencas forestales no disturbadas. Estos resultados los atribuyeron al efecto de las actividades que se realizan en la extracción de la madera y preparación mecánica del sitio y señalan que el pastoreo sólo afecta ligeramente.

El manejo de la reforestación integrado a la siembra con especies gramíneas, es otro factor importante a considerar en el manejo del terreno. Anderson y Brooks (1975) señalan la importancia de mantener una cubierta vegetal de gramíneas para reducir la erosión en la regeneración natural un bosque de coníferas quemado. Mencionan que al sembrar gramíneas, leguminosas y arbustos, se obtienen mejores resultados con las primeras y se logra reducir la erosión a menos de 2 ton/ha después de dos años del establecimiento.

Las actividades de manejo en las reforestaciones, tales como preparación del terreno, construcción de caminos y uso del fuego, generalmente incrementan las tasas de erosión y el flujo superficial; sin embargo, la magnitud de tales efectos aún no se puede predecir con

exactitud, sólo se sabe que depende del grado de disturbio causado.

Uso de Simuladores de Lluvia en Estudios de Erosión

La simulación de lluvia es una técnica que permite aplicar agua en forma de lluvia en parcelas pequeñas, para obtener información en investigaciones sobre infiltración, escurrimiento, producción de sedimentos y pérdida de nutrimentos del suelo (Neff, 1979). Su uso se ha extendido en los EUA desde 1930 y en México ha permitido realizar algunas investigaciones en las zonas árida y semiárida, en áreas de pastizal y bosque (Sánchez, 1984; Beltrán, 1988; Zárate, 1988; De Luna, 1989; Dueñez, 1993).

Todavía no ha sido desarrollado un simulador de lluvia ideal; este debería reproducir los patrones e intensidad de una lluvia natural, lo cual además de ser costoso, requeriría grandes gastos energéticos en ensamblaje y operación (Foster et al. 1979); sin embargo, constituyen un equipo útil en el estudio de la mecánica de la erosión y procesos hidrológicos, en zonas de escasa precipitación donde el realizar investigaciones dependientes de la lluvia requeriría de períodos largos de tiempo.

Existen dos tipos de simuladores de lluvia: los de goteo y los aspersores. En los primeros se utilizan tubos capilares, discos giratorios, goteadores de hilo o agujas

hipodérmicas; en los de aspersión, el formador de gotas es una boquilla a la que le antecede un sistema de agua a presión, para lograr la lluvia con las condiciones deseadas (Kirkby y Morgan, 1984).

El uso de simuladores portátiles es adecuado en las condiciones de bosque, pastizal o matorral, donde la pendiente del terreno y la arquitectura de la vegetación, limitan el establecimiento y utilización de grandes parcelas experimentales que dependan de la lluvia. Para esas zonas se han desarrollado diversos simuladores de lluvia de acuerdo a lo descrito por Laflen (1981), entre ellos se encuentra el desarrollado por Wilcox et al. (1986).

MATERIALES Y METODOS

Descripción del área de estudio

El estudio se realizó en el área reforestada "Zapalinamé" de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Verano de 1992; el área se ubica a 7 km al Sur del centro de la Cd. de Saltillo, por la carretera 54 Saltillo-Concepción del Oro, Zac. La superficie total de la reforestación comprende 2000 ha y se localiza entre las coordenadas geográficas $25^{\circ}20'00''$ y $25^{\circ}23'42''$ LN y entre los $100^{\circ}59'57''$ y $101^{\circ}02'00''$ LW; su altura media sobre el nivel del mar es de 1850 m (Figura 3.1).

De acuerdo a la información presentada por Mendoza (1983) el clima del área de estudio corresponde al BWhw(x')(e) de la clasificación de Köppen modificada por García (1973), con las siguientes características: Clima extremosos, muy seco, con un coeficiente P/T mayor de 22.9; la temperatura media anual oscila entre 18 y 22 °C; se considera cálido con invierno fresco; presenta un régimen de lluvias de verano con porcentaje de lluvia invernal mayor al 10 por ciento. La precipitación media anual es de 350 mm y se presenta con mayor frecuencia en

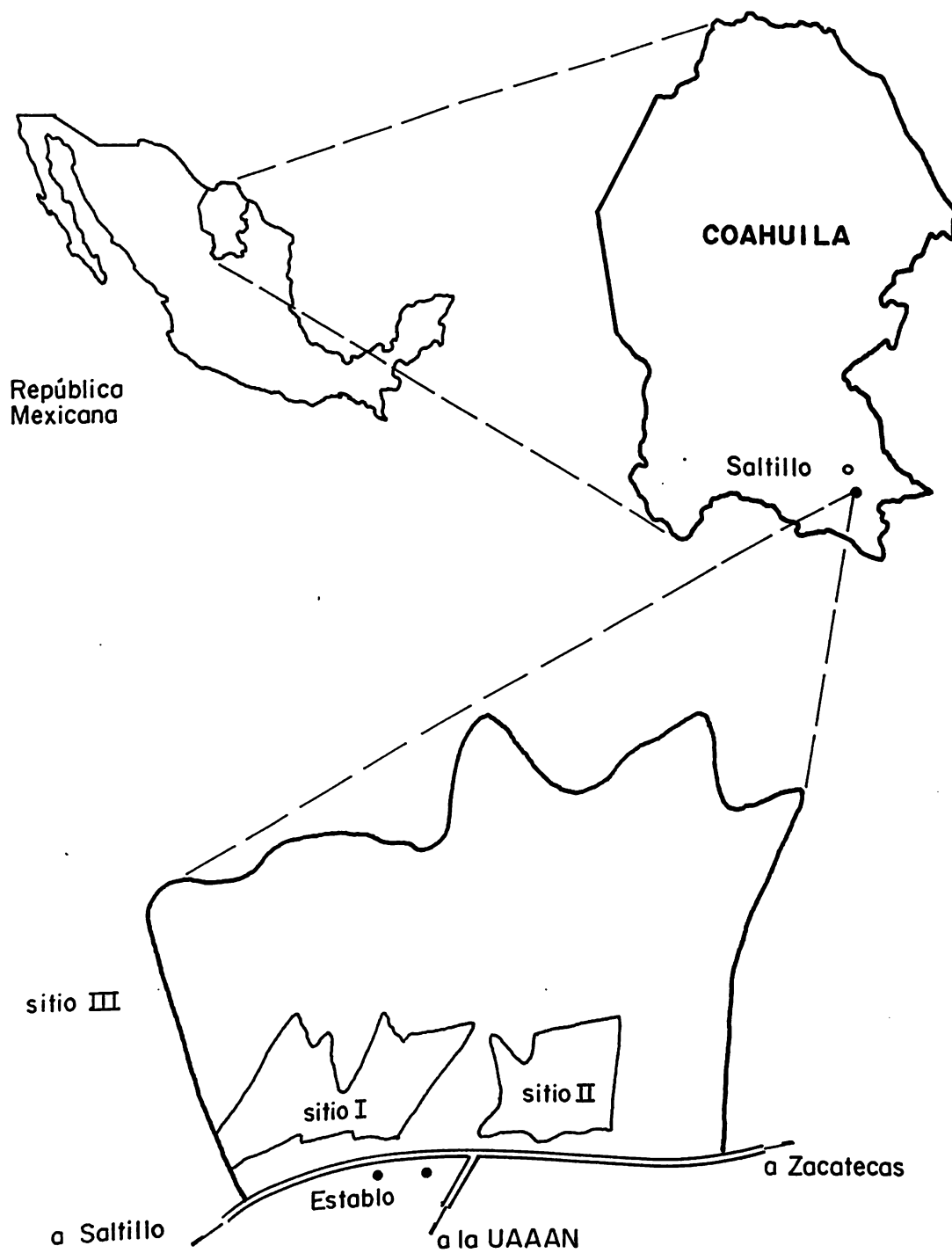


Figura 3.1. Ubicación de los sitios de estudio.

los meses cálidos; el 76 por ciento de la precipitación total anual cae durante los meses de Mayo a Octubre; Marzo y Noviembre son los meses más secos. La precipitación invernal se presenta en forma de lluvias ligeras y rocío principalmente.

El área de estudio presenta un suelo Rendoll, el cual se caracteriza por presentar un epipedón mólico, descansando directamente sobre fragmentos gruesos de piedras y rocas calcáreas. La profundidad del suelo varía de 11 a 42 cm, textura franco-arenosa, de color café muy oscuro (10 YR 3/2); presenta estructura en bloques subangulares finos que se rompen para formar gránulos medios y finos; friable cuando húmedo y ligeramente duro en seco; raíces abundantes. De acuerdo a la agrupación FAO/UNESCO corresponde a un Leptosol rendzico.

En relación a la vegetación, la principal especie es Pinus halepensis asociada a gramíneas de los géneros Aristida sp y Bouteloua sp principalmente y otras especies arbustivas como Agave asperima y Mimosa biuncifera; en el área sin reforestar, la vegetación de gramíneas es similar; se encuentran además otros arbustos como Acacia farnesiana y Opuntia imbricata.

Metodología

Los sitios sujetos a evaluación corresponden a reforestaciones realizadas en 1961 y 1973, así como un sitio sin reforestar. Sus principales características se presentan a continuación de acuerdo a lo descrito por Dueñez (1988):

El sitio reforestado en 1961 se encuentra a 1830 msnm; presenta una pendiente de 8 a 15 por ciento; en la parte baja del área los suelos son relativamente profundos, mientras que en la parte alta son someros, observando alta pedregosidad y afloramientos rocosos con profundidades de 15 a 50 cm y textura migajón arcillo-arenoso y migajón arenoso, pH alcalino de 8.0 a 8.5, con exposición sureste. La vegetación asociada es principalmente Bouteloua curtipendula, B. gracilis, Aristida sp, Lycurus phleoides, Tiquilia canescens, Opuntia rastrera, Mimosa zygophylla, Opuntia leptocaulis y Condalia spathulata. El área cubre 72.23 hectáreas.

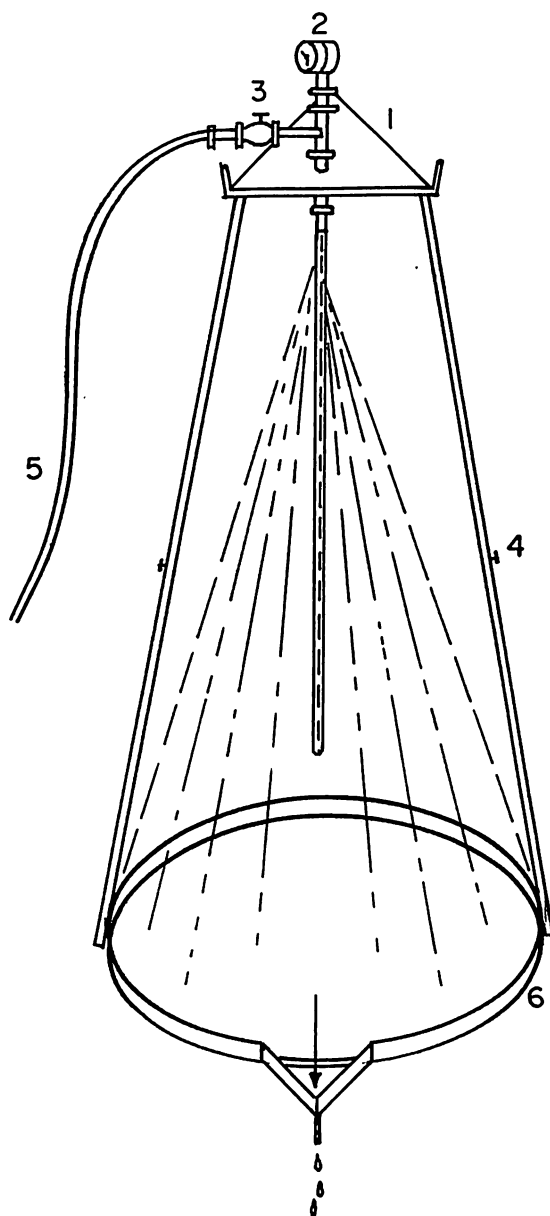
El sitio reforestado en 1973 presenta una elevación de 1890 msnm; con pendientes de 2 a 15 por ciento; la profundidad del suelo varía de 15 a 50 cm con textura migajón arcillo arenoso; el pH varía de 8.2 a 8.4, con exposición Sur. La vegetación asociada es similar a la encontrada en el sitio anterior. El área

cubre 53 hectáreas.

En relación al sitio sin reforestar, éste se encuentra a una altitud de 1835 msnm; con pendientes de 5 a 15 por ciento; la profundidad del suelo es de 10 a 45 cm, textura migajón arcillo arenoso y migajón arenoso, con pH de 8.2 a 8.5; la vegetación representativa es Bouteloua curtipendula, B. gracilis, Aristida sp, Erioneuron pulchellum, Mimosa biuncifera, Agave sp, Opuntia sp, Berberis trifoliolata y Gymnosperma glutinosum. El sitio se localiza colindando al norte con el área reforestada.

Simulación de Lluvia

En el estudio se utilizó un simulador de lluvia el cual fue construido en el Departamento de Recursos Naturales de la UAAAN (Dueñez, 1993) de acuerdo al modelo desarrollado por Wilcox et al. (1986); es portátil del tipo aspersor (Figura 3.2). La lluvia se aplicó sobre el terreno natural desde una altura de 1.55 m en parcelas circulares delimitadas por una estructura de metal (anillo colector) de un metro de diámetro, con salida sobre el perímetro por donde se desalojó el escurrimiento; la estructura se enterró a una profundidad de cinco cm y sobre ella se colocó el simulador, cuidando que la boquilla del rociador, coincidiera con el centro de la parcela. Antes de proceder a la colocación del simulador



- 1.- Placa con boquilla aspersora.
- 2.- Manómetro.
- 3.- Válvula de paso.
- 4.- Patas ajustables.
- 5.- Manguera de conducción de agua.
- 6.- Anillo colector.

Figura 3.2. Esquema del simulador de lluvia.

se realizó una excavación para colocar un recipiente colector de donde se cuantificó el escurrimiento generado en las diferentes etapas de la simulación. Se instaló una cortina rompevientos fijada alrededor del simulador desde la placa de la cabeza del rociador hasta el ras del suelo, para evitar el efecto del viento sobre la lluvia aplicada en el transcurso de la prueba. Las características de la lluvia aplicada fueron las siguientes:

Duración:	30	minutos
Lámina aplicada:	49.28	mm
Intensidad:	98.56	mm/hr
Energía por mm:	0.1055	MJ/ha
Energía por 30 min aplicación:	5.1989	MJ.ha
EI30:	512.4077	MJ.mm/ha.hr

El cálculo de la erosividad de la lluvia aplicada se realizó con el índice propuesto por Wischmeier y Smith (1978) con las modificaciones al sistema de unidades realizado por Foster et al. (1981) (apéndice A.1) ✓

Tratamientos y Unidades de Muestreo

Los sitios de reforestación descritos anteriormente, son considerados los tratamientos del presente estudio; se buscó en lo posible que los tres sitios estuvieran en la misma posición fisiográfica y con características de suelo y pendiente similares, para

estimar sólo el efecto de la cobertura vegetal sobre la pérdida de suelo y en la erosionabilidad. De esta forma los tratamientos fueron:

- I: Reforestación de 31 años.
- II: Reforestación de 19 años.
- III: Area sin reforestar

En cada sitio se seleccionaron al azar seis unidades de muestreo, las cuales constituyen para efecto de análisis, las repeticiones por tratamiento. La unidad de muestreo se delimitó con el anillo colector del simulador.

Infiltrabilidad y Esgurrimiento Superficial

(La infiltrabilidad y el esgurrimento superficial fueron evaluados al momento de aplicar la lluvia en cada una de las unidades de muestreo; durante períodos de cinco minutos se cuantificó el volumen de esgurrimento captado en el colector (y los datos fueron transformados a lámina de esgurrimento. La infiltrabilidad se estimó como la diferencia entre la tasa de lluvia aplicada y la tasa de esgurrimento.) En el apéndice A.2. se ejemplifica la forma de registro y secuencia de los cálculos para la obtención de estas dos variables.

(Para estimar el porcentaje de agua infiltrada en relación al volumen total aplicado a cualquier intervalo de tiempo se aplicó la siguiente expresión:

$$\% \text{ Infiltración} = 100 \frac{\alpha}{0.1643 \text{ cm/min}}$$

Donde 0.1643 cm/min es el valor máximo que puede tomar la infiltrabilidad en función de la lámina de lluvia aplicada.

Estimación de la erosión

(La erosión se evaluó con la producción de sedimentos obtenidos durante la prueba. Para cuantificarlos se homogeneizó el volumen de escurrimiento colectado y se tomó una alícuota de un litro; lo anterior se realizó para cada período de cinco minutos en todas las unidades de muestreo donde se registró escurrimiento.) Los sedimentos fueron separados del agua por filtración y se secaron en estufa a 105 °C durante 24 hr; posteriormente fueron pesados en balanza analítica; el registro del peso se llevó a diezmilésima de gramo. Considerando el volumen escurrido, se calculó la producción de sedimentos y los datos fueron transformados a kg/ha. La erosión del suelo se estimó con las siguientes evaluaciones: tasa de erosión, erosión total, erosión inicial y erosión acumulada en relación al escurrimiento.

La tasa de erosión relaciona la producción de sedimentos con la duración de la lluvia y se expresa en kg/ha/min; es un indicador de la cantidad de suelo que se

erosiona por cada minuto de lluvia.

La erosión total se refiere a la cuantificación de los sedimentos producidos en cada unidad de muestreo durante la aplicación de la lluvia; sus unidades son kg/ha.

La erosión inicial representa la relación entre la producción de sedimentos y la lámina de escurrimiento en los primeros diez minutos de lluvia. Se expresa en kg/ha/cm.

Por último, la erosión acumulada en relación al escurrimiento representa la relación que guarda la producción total de sedimentos con la lámina de escurrimiento cuantificada en los treinta minutos de lluvia. Sus unidades son kg/ha/cm.)

(Erosionabilidad del Suelo

La erosionabilidad del suelo se estimó con la ecuación desarrollada por Wischmeier y Smith (1978), cuya expresión es:

$$100K = (2.1 \times 10^{-4}) (M^{1.14}) (12-a) + 3.25(b-2) + 2.5(c-3)$$

En donde:

K = Factor de erosionabilidad del suelo

- M = (Porcentaje de limos + arenas muy finas)(100
menos por ciento de arcilla)
- a = Por ciento de materia orgánica
- b = Código de estructura del suelo (Cuadro 2.1)
- c = Código de permeabilidad del perfil (Cuadro 2.2)

El valor obtenido se multiplicó por 0.1317 para transformar a unidades del Sistema Métrico Internacional (Foster et al. 1981). Las variables implicadas en la ecuación se estimaron con los siguientes métodos:

De una muestra de suelo tomada de los primeros 20 cm de profundidad, se determinó materia orgánica por el método de Walkey y Black.

La estructura del suelo se observó en los primeros 20 centímetros del perfil y se codificó para su uso en la ecuación de erosionabilidad de acuerdo a la clasificación del cuadro 2.1.

La permeabilidad fue obtenida a través de los registros de infiltrabilidad de las pruebas de simulación de lluvia realizadas en cada unidad de muestreo, de acuerdo a lo señalado por Wischmeier y Smith (1978) en el sentido de que los datos de campo pueden ser utilizados en la determinación de permeabilidad. Los resultados se codificaron para su uso en la ecuación, de acuerdo a la

clasificación descrita en el cuadro 2.2.

En relación a la distribución del tamaño de partículas, de una muestra compuesta, tomada de los primeros 20 cm de profundidad del suelo se determinó la distribución del tamaño de partículas por el método de la pipeta basado en la Ley de Stokes de velocidad de caída de las partículas en medio acuoso. El tamaño de partículas se agrupó en tres clases:

Fracción arcilla:	menor de 0.002 mm
Limos mas arenas muy finas:	0.002 - 0.1 mm
Arenas	mayor de 0.1 mm

Estabilidad de Agregados

El análisis de agregados se hizo por el método de tamizado en húmedo, para medir el porcentaje de partículas secundarias estables en el agua y el grado en que las partículas más finas están agrupadas en agregados más gruesos; el equipo utilizado fue el juego de tamices Yoder. El resultado se expresó con el Diámetro Medio Geométrico (DMG) como índice de agregación que resulta de multiplicar el peso de los agregados de la fracción obtenida en cada tamiz de un tamaño dado, por el logaritmo del diámetro medio de esa fracción (Baver et al. 1972).

En el apéndice A3 se encuentra la secuencia seguida para estimar el DMG.

Variables de la Vegetación

Antes de iniciar la simulación de lluvia, se realizaron mediciones de cobertura aérea dentro de la unidad de muestreo utilizando el marco de puntos, el cual se colocó cubriendo el diámetro del anillo colector en el sentido del escurrimiento. Se registró la presencia de gramíneas, mantillo orgánico, suelo desnudo y grava; el porcentaje de los componentes de la cobertura, se estimó dividiendo el número de observaciones o puntos que tocaron alguno de los componentes entre el total de observaciones.

Una vez realizada la prueba de simulación de lluvia, se procedió a cortar la vegetación al ras del suelo, la cual se separó en gramíneas, mantillo orgánico y arbustos; las muestras se colocaron en bolsas de papel para su secado en estufa a 85 °C durante tres días y la obtención del peso a la décima de gramo mas cercano, de esta forma se obtuvo la fitomasa aérea.

Además se realizaron determinaciones complementarias del suelo, las cuales se indican a continuación:

La humedad del suelo antes de aplicar la lluvia (humedad inicial o humedad antecedente) se estimó con el método gravimétrico.

La densidad aparente del suelo fue evaluada utilizando un extractor de núcleos; se obtuvo una muestra inalterada de suelo de 0 a 20 cm de profundidad, en una área ubicada a medio metro de la unidad de muestreo. La muestra de suelo se secó en estufa a 105 °C durante 48 hr, posteriormente se pesaron al décimo de gramo más cercano. La densidad aparente se obtuvo al dividir el peso del suelo seco entre el volumen del extractor.

Antes de iniciar la simulación de lluvia se tomaron muestras de profundidad del suelo en la parte donde se realizó la excavación para introducir el colector del escurrimiento. Se registraron tres profundidades y se obtuvo su promedio.

La pendiente del terreno se determinó con un clisímetro para cada una de las unidades de muestreo.

Análisis estadístico

(Para determinar el comportamiento de la infiltrabilidad y de la erosión a través del tiempo, se utilizaron técnicas de regresión lineal simple con y sin

coeficiente de intercección.

Con análisis de correlación lineal simple, se identificaron las variables posiblemente mas relacionadas con los procesos de infiltración, escurrimiento y erosión; en algunos casos los datos sugirieron no linealidad. Cuando la no linealidad fue evidente, se graficó su tendencia.

A continuación, con un procedimiento "step wise", se procedió a buscar el modelo de regresión lineal múltiple con "mejor ajuste" para cada una de las siguientes variables:

Variables dependientes

Y1	=	Infiltrabilidad (I)	cm/hr
Y2	=	Infiltración acumulada (IA)	cm
Y3	=	Lámina de escurrimiento (LE)	cm
Y4	=	Tasa de Erosión (TE)	kg/ha/min
Y5	=	Erosión total (E)	kg/ha
Y6	=	Erosión inicial (EI)	kg/ha/cm
Y7	=	Erosión acumulada en relación al escurrimiento (EAE)	kg/ha/cm

Variables independientes

X1	=	Pendiente del terreno	%
X2	=	Contenido de materia orgánica	%
X3	=	Profundidad del suelo	cm
X4	=	Arenas gruesas	%
X5	=	Arenas finas mas limo	%
X6	=	Arcilla	%
X7	=	Estabilidad de agregados	DMG
X8	=	Densidad aparente	gr/cm ³
X9	=	Contenido inicial de humedad	%
X10	=	Fitomasa aérea de veget. en pié	gr/m ²
X11	=	Fitomasa aérea de mantillo	gr/m ²
X12	=	Fitomasa aérea total	gr/m ²
X13	=	Cobertura aérea de gramíneas	%
X14	=	Cobertura aérea de mantillo	%
X15	=	Cobertura aérea total	%
X16	=	Cobertura de suelo desnudo	%
X17	=	Cobertura de piedra o grava	%

Los parámetros que se utilizaron para determinar el modelo de mejor ajuste fueron el coeficiente de determinación (R^2), el cuadrado medio del error (CME) y el valor de F_c , obtenidos en el análisis de varianza del modelo.

Para evaluar las diferencias entre los tres sitios de muestreo con respecto a infiltrabilidad, lámina de escurrimiento, erosión, erosionabilidad y estabilidad de

agregados, se utilizó el análisis de varianza en un diseño completamente al azar; cuando el análisis de varianza presentó significancia al nivel 0.05 o menos, se realizaron pruebas de medias (Tukey, 0.05), para identificar los sitios diferentes.

RESULTADOS

Infiltrabilidad y Escurrimiento Superficial

De acuerdo al análisis de regresión lineal, en el período de aplicación de la lluvia (30 min) la infiltrabilidad como función de tiempo, tuvo un comportamiento casi lineal, con ordenada al origen y se ajustó al siguiente modelo:

$$I = \alpha t + \epsilon$$

En el cuadro 4.1 se presentan las estimaciones de la pendiente (α), la infiltrabilidad, el coeficiente de determinación (R^2) y el porcentaje de agua infiltrada. Los valores de R^2 fueron altos, por lo cual la caracterización de la infiltración se considera adecuada.

Infiltrabilidad

De acuerdo al análisis de correlación, las variables que más se relacionaron con la infiltrabilidad fueron: porcentaje de suelo desnudo ($r = -0.773$); cobertura vegetal total ($r = 0.752$); cubierta de mantillo ($r = 0.630$); estabilidad de agregados ($r = 0.53$); profundidad del suelo ($r = 0.53$) y biomasa del mantillo ($r = 0.496$); en las figuras 4.1 - 4.4 se presentan algunas de estas

relaciones. La matriz de correlación se encuentra en el Apéndice B.1.

El modelo obtenido por el procedimiento Stepwise para la velocidad de infiltración, incluye las variables cobertura de mantillo, cobertura de gramíneas, suelo desnudo y grava, de acuerdo a la información presentada en el Cuadro 4.2.

Cuadro 4.1. Valores de infiltrabilidad, porcentaje de agua infiltrada y coeficiente de determinación R^2 para el modelo $I = \alpha t + \epsilon$

Sitio	Lámina Infiltrada (%)	Infiltra-bilidad (cm/hr)	α	R^2
I	77.75	7.66	0.1277	0.9964
	99.84	9.84	0.1640	1.0000
	88.83	8.75	0.1459	0.9989
	74.94	7.39	0.1231	0.9963
	100.00	9.86	0.1643	1.0000
	100.00	9.86	0.1643	1.0000
II	71.34	7.03	0.1172	0.9901
	98.09	9.67	0.1611	0.9998
	67.72	6.68	0.1113	0.9844
	45.56	4.49	0.0749	0.9556
	90.62	8.93	0.1489	0.9981
	54.64	5.39	0.0898	0.9856
III	58.11	5.73	0.0955	0.9850
	72.84	7.18	0.1197	0.9917
	99.28	9.79	0.1631	1.0000
	52.08	5.13	0.0855	0.9818
	100.00	9.86	0.1634	1.0000
	32.44	3.20	0.0533	0.9299

α = pendiente (infiltrabilidad expresada en cm/min)
 R^2 = coeficiente de determinación

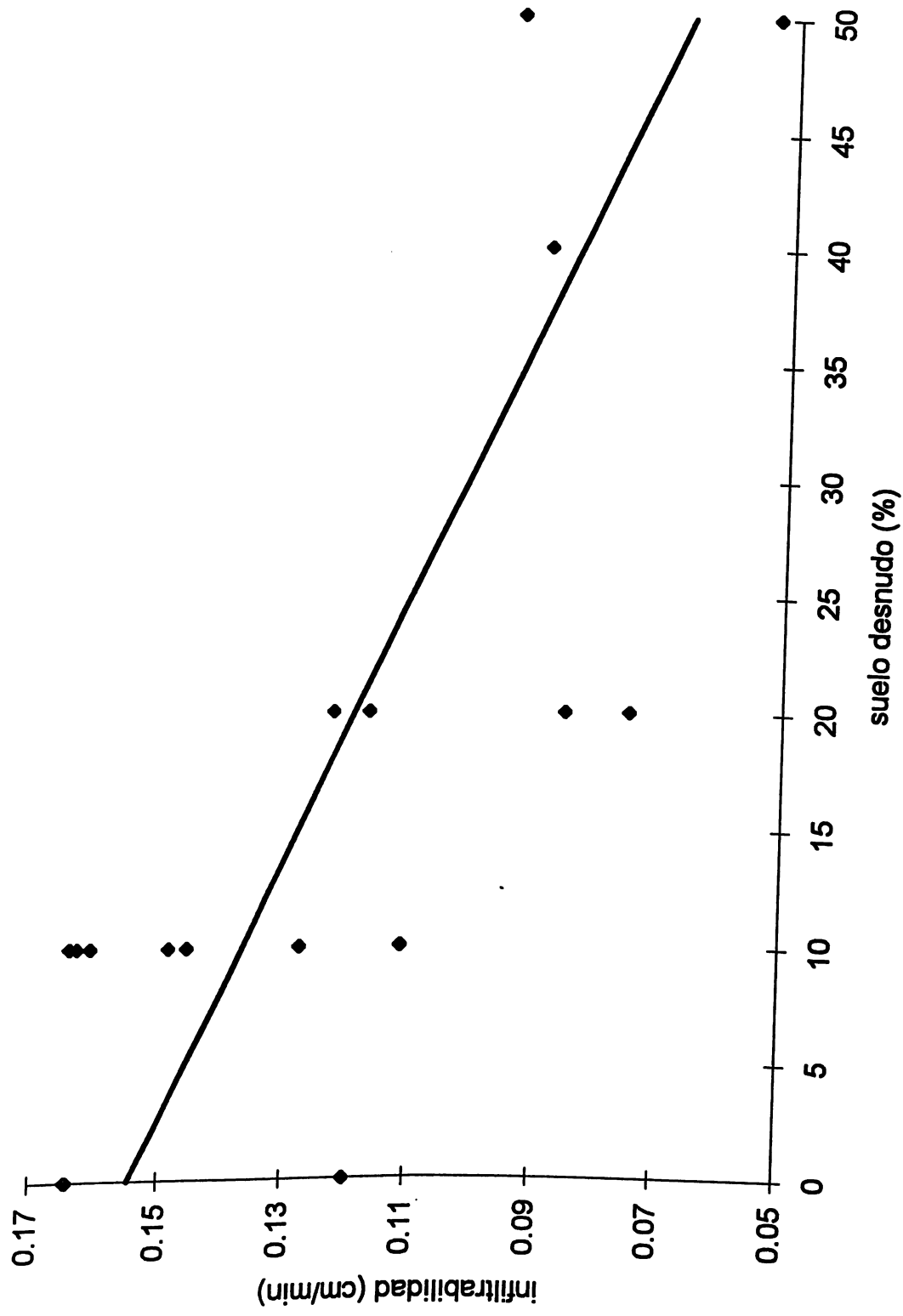


Figura 4.1. Relación entre infiltrabilidad y suelo desnudo en la Reforestación Zapalinamé

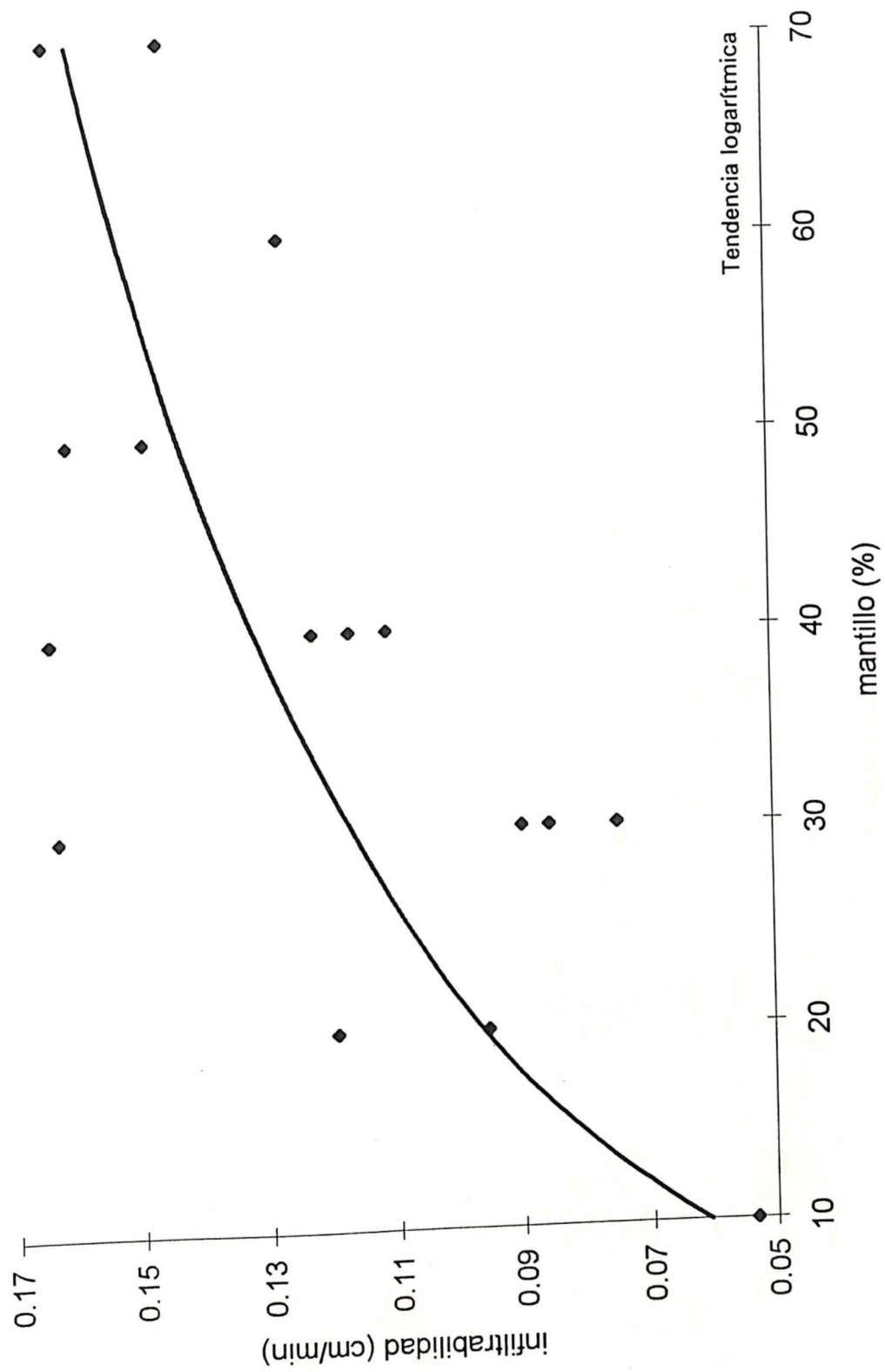


Figura 4.2. Relación entre infiltrabilidad y cobertura del mantillo orgánico en la Reforestación Zapalinamé

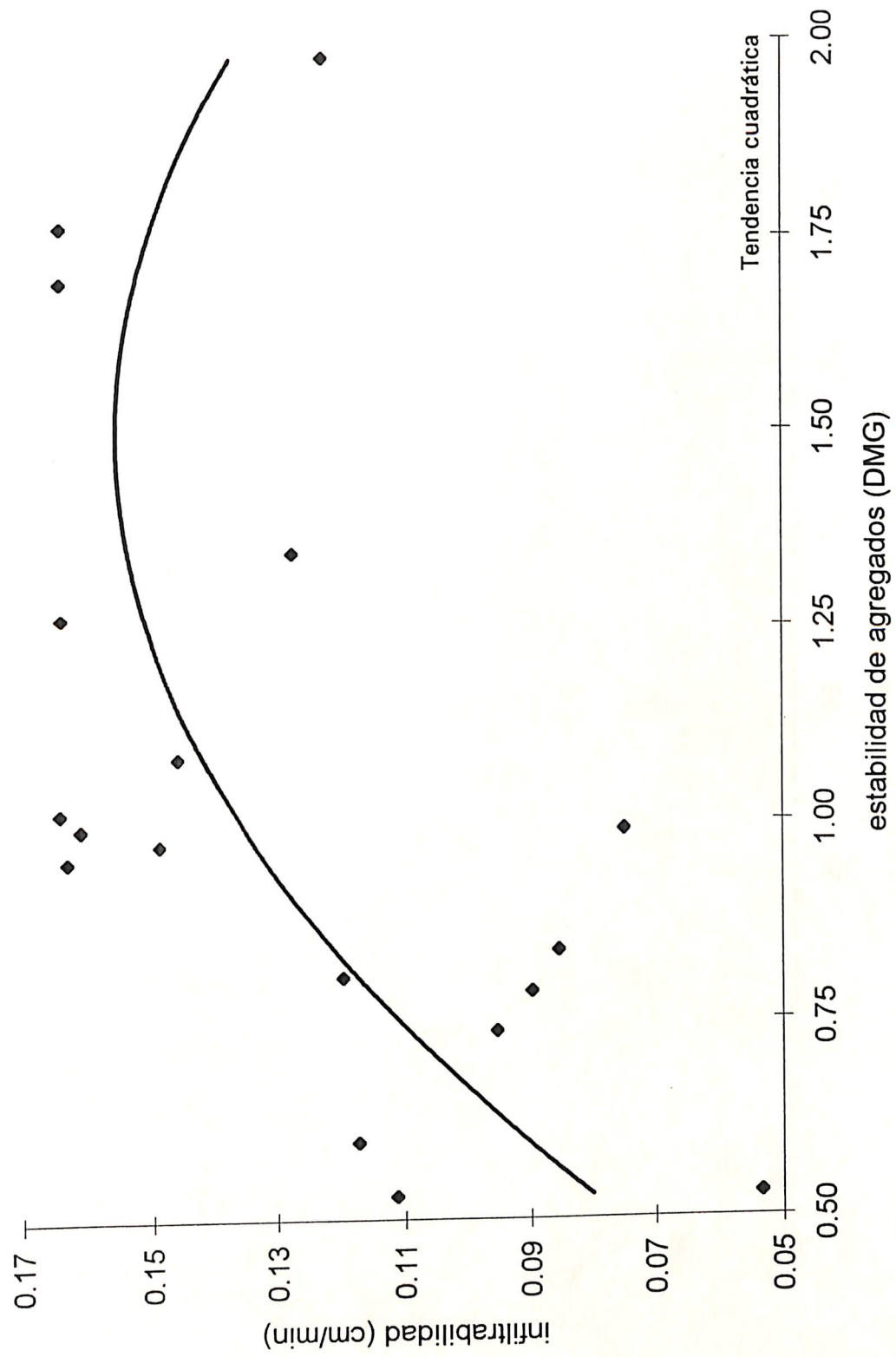


Figura 4.3. Relación entre infiltrabilidad y estabilidad de agregados en la Reforestación Zapalinamé

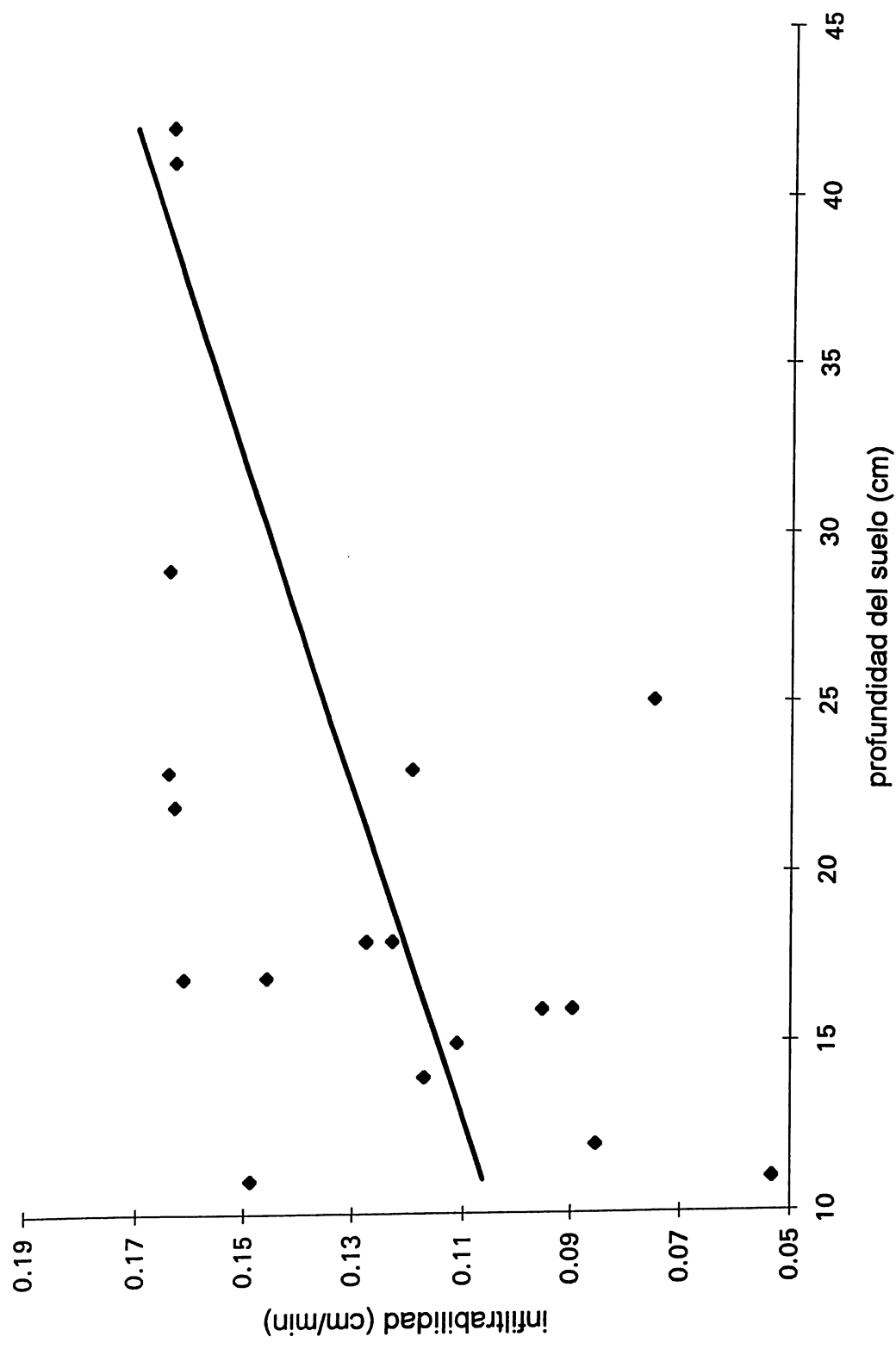


Figura 4.4. Relación entre infiltrabilidad y profundidad del suelo en la Reforestación Zapalinamé

Cuadro 4.2. Modelo ajustado para la infiltrabilidad:
 $V = \alpha + \beta m + \delta r + \tau d + fg + \epsilon$

Variable independiente	Coeficiente	Error estándar	tc
Intercepto	$\alpha = 0.489605$	0.140732	3.48**
Mantillo (m)	$\beta = -0.003065$	0.001421	-2.16*
Gramíneas (r)	$\delta = -0.003668$	0.001462	-2.51*
Suelo desnudo(d)	$\tau = -0.004886$	0.001414	-3.45**
Grava (g)	$f = -0.004616$	0.001574	-2.93*

$t(0.05)=2.51$

$R^2 = 0.78751$

$F_c = 12.0452 **$

Cuadrado medio del error = 0.00035144

Error estándar del modelo = 0.0187467

El valor de F_c (12.0452), fue significativo mas allá del nivel 0.01 de probabilidad del Error Tipo I (α), lo cual nos indica que la regresión si existe, dado que el valor del coeficiente de regresión es diferente de cero. Los resultados del análisis de varianza para el modelo se presentan en el Apéndice B.2.

En la figura 4.5 se muestra la infiltrabilidad a través del tiempo en los tres sitios bajo estudio, en donde se observa que ésta fue similar a los cinco minutos de iniciada la lluvia en los tres sitios y que al finalizar la prueba, el sitio I presentó los valores mas altos de infiltrabilidad, comparado con el sitio II y el sitio sin reforestar.

Los valores de infiltrabilidad se sometieron a un análisis de varianza (Apéndice B.8); los resultados de dicho análisis, con las medias observadas se presentan en el Cuadro 4.3.

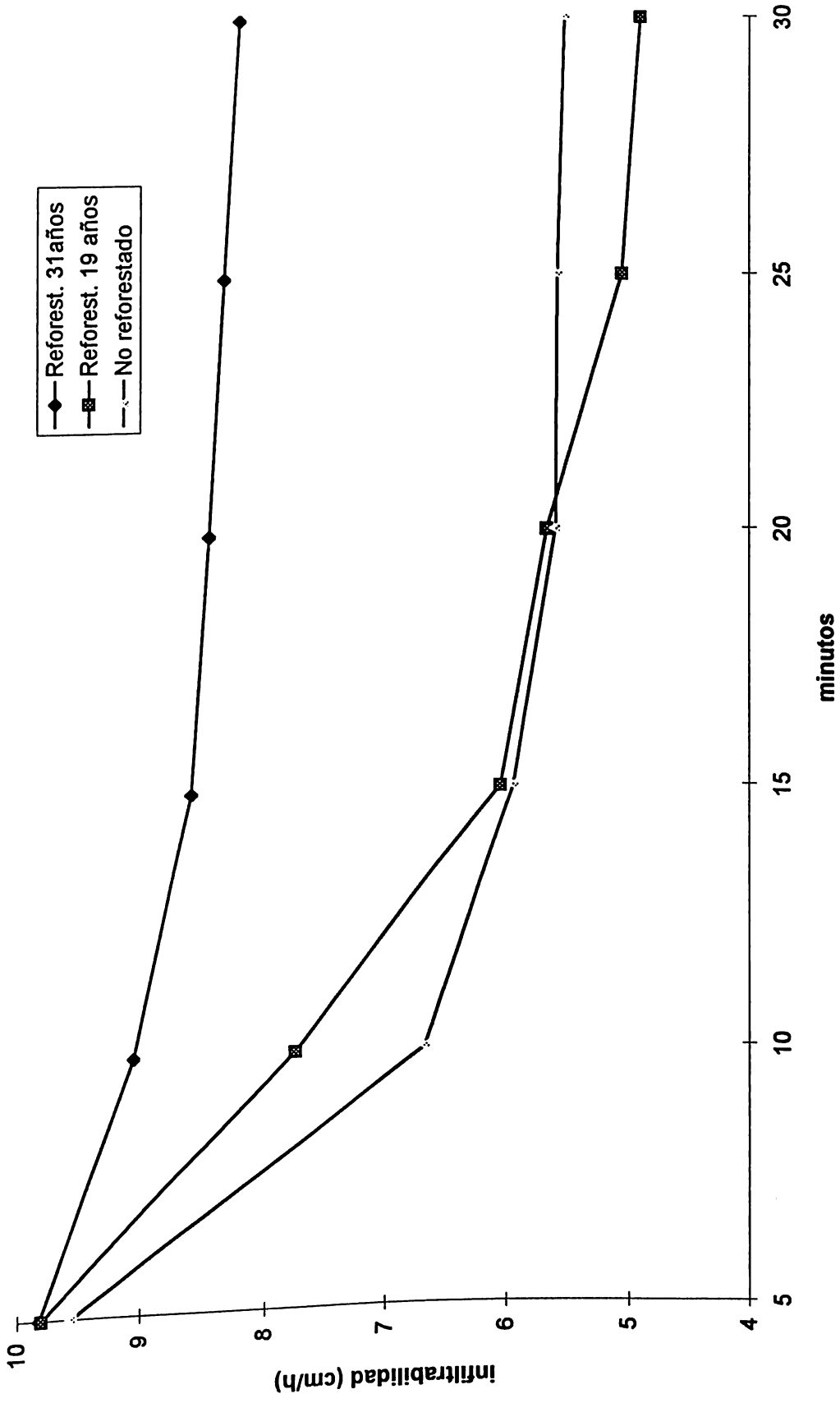


Figura 4.5. Infiltrabilidad a través del tiempo en la Reforestación Zapalinamé

Cuadro 4.3. Valor de F y medias observadas para la infiltrabilidad (cm/hr)

Medias observadas por sitio			Fc
I	II	III	
8.89	7.03	6.82	1.906 NS

De acuerdo a estos resultados, el análisis de varianza no detectó diferencias estadísticas entre tratamientos a un nivel de significancia de 0.05.

Infiltración Acumulada

(Los valores de infiltración acumulada (cm), variaron de 3.5 a 4.9 cm en el sitio I, de 1.8 a 4.7 en sitio II y de 1.3 a 4.9 cm en el sitio sin reforestar. En la figura 4.6 se muestra la infiltración acumulada a través del tiempo para cada una de las unidades de muestreo, de acuerdo a la información que se presenta en el Cuadro 4.4.

Escurrimiento Superficial

El análisis de correlación nos indica que las variables de suelo y vegetación más relacionadas con el escurrimiento superficial son: porcentaje de suelo desnudo ($r = -0.740$), cobertura de mantillo ($r = -0.618$), profundidad del suelo ($r = -0.545$) y estabilidad de agregados ($r = -0.540$); algunas de estas relaciones pueden apreciarse en las figuras 4.7 a 4.9.

Cuadro 4.4. Lámina infiltrada (cm) a través del tiempo (min).

Sitio	minutos					
	5	10	15	20	25	30
Reforest. 31 años	0.8214	1.4909	2.0666	2.6066	3.1403	3.6637
Reforest. 31 años	0.8214	1.6408	2.4601	3.2815	4.1029	4.9178
Reforest. 31 años	0.8214	1.5855	2.2860	2.9775	3.6245	4.2523
Reforest. 31 años	0.8049	1.4327	1.9855	2.5128	3.0324	3.5291
Reforest. 31 años	0.8214	1.6428	2.4642	3.2856	4.1070	4.9284
Reforest. 31 años	0.8214	1.6428	2.4642	3.2856	4.1070	4.9284
Promedio:	0.8186	1.5726	2.2878	2.9916	3.6857	4.3700
Reforest. 19 años	0.8214	1.5002	2.0033	2.4427	2.8465	3.2477
Reforest. 19 años	0.8195	1.6367	2.4517	3.2693	4.0461	4.7606
Reforest. 19 años	0.8214	1.5142	1.9524	2.3536	2.6899	3.0084
Reforest. 19 años	0.7972	1.1844	1.4023	1.6151	1.7655	1.8994
Reforest. 19 años	0.8214	1.6428	2.3942	3.0768	3.6767	4.2931
Reforest. 19 años	0.8214	1.2965	1.5933	1.8774	2.1386	2.4074
Promedio:	0.8171	1.4625	1.9662	2.4392	2.8606	3.2694
Sin reforestar	0.8098	1.2709	1.6339	1.9689	2.3091	2.6275
Sin reforestar	0.8214	1.5218	2.0097	2.4682	2.9178	3.3483
Sin reforestar	0.8214	1.6377	2.4591	3.2761	4.0873	4.8654
Sin reforestar	0.7654	1.1361	1.5016	1.7819	2.0584	2.3272
Sin reforestar	0.8214	1.6428	2.4642	3.2856	4.1070	4.9284
Sin reforestar	0.7425	0.9056	1.0178	1.1096	1.2078	1.3608
Promedio:	0.7970	1.3525	1.8477	2.3151	2.7812	3.2429

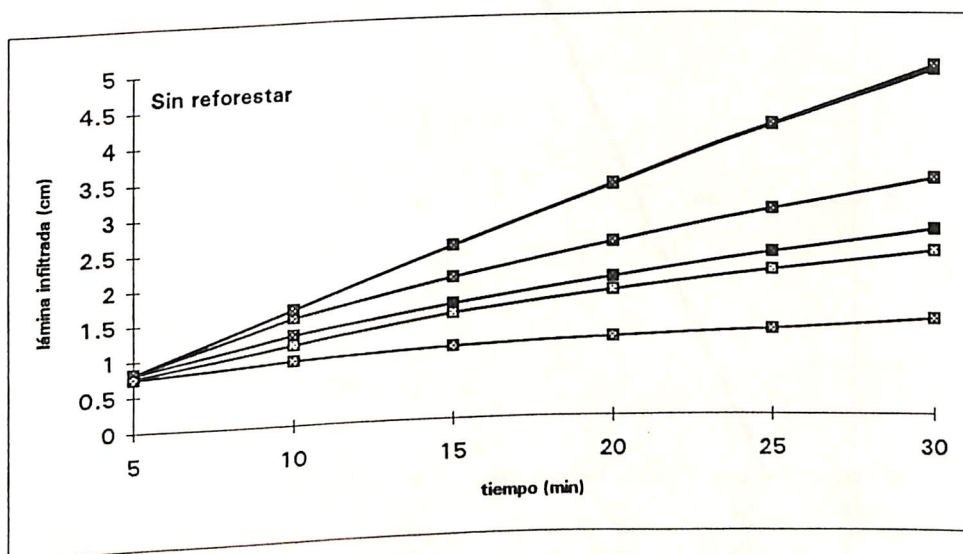
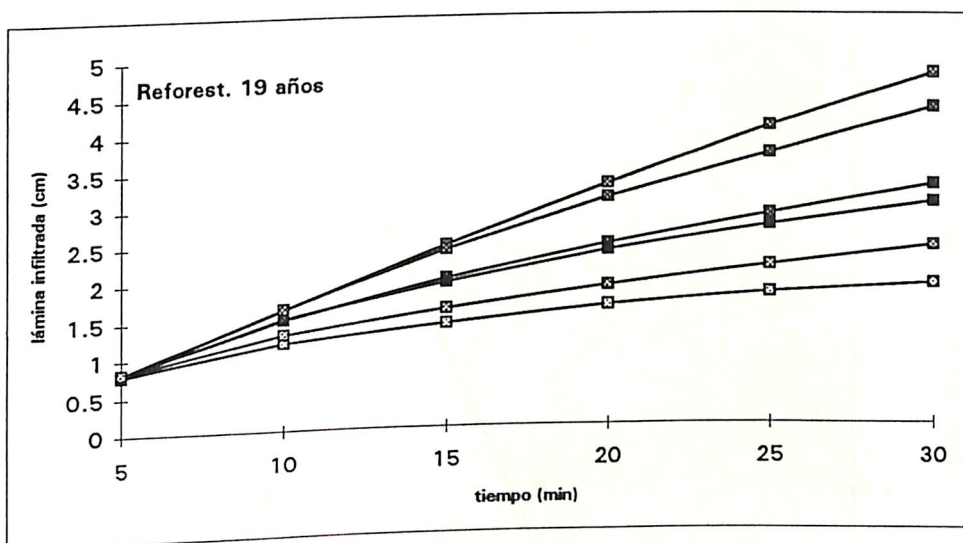
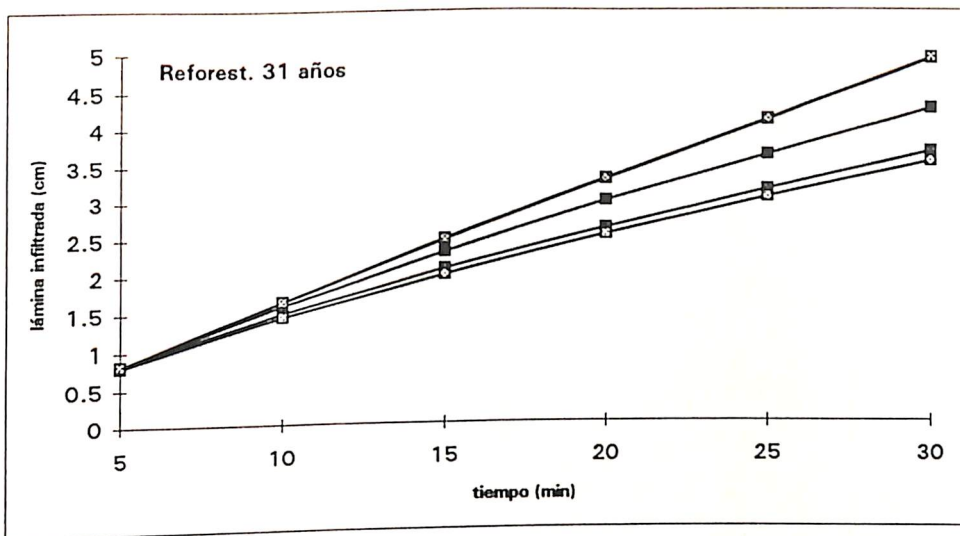


Figura 4.6. Infiltrabilidad acumulada a través del tiempo

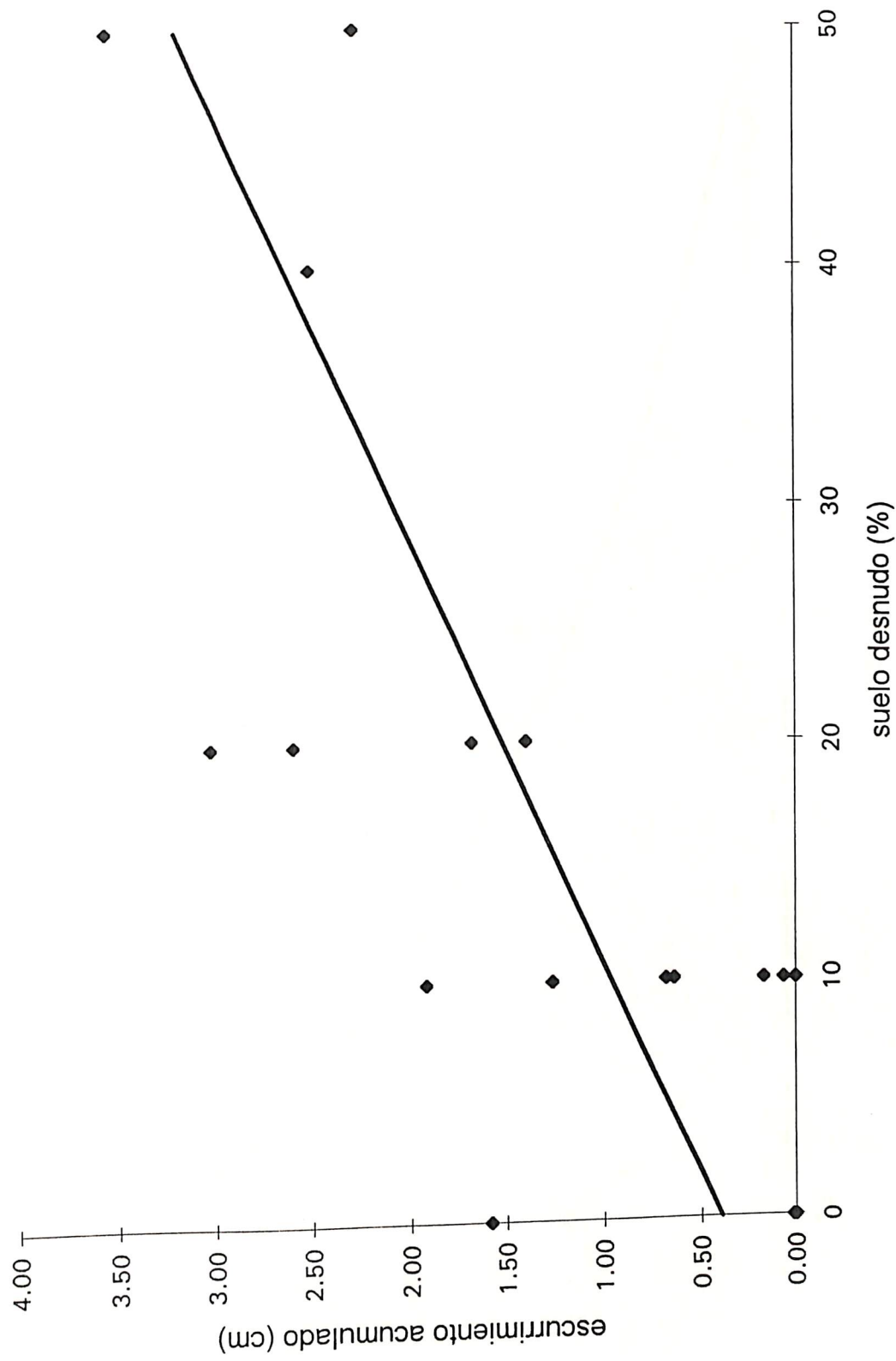


Figura 4.7. Relación entre lámina de escurrimiento y suelo desnudo en la Reforestación Zapaliname

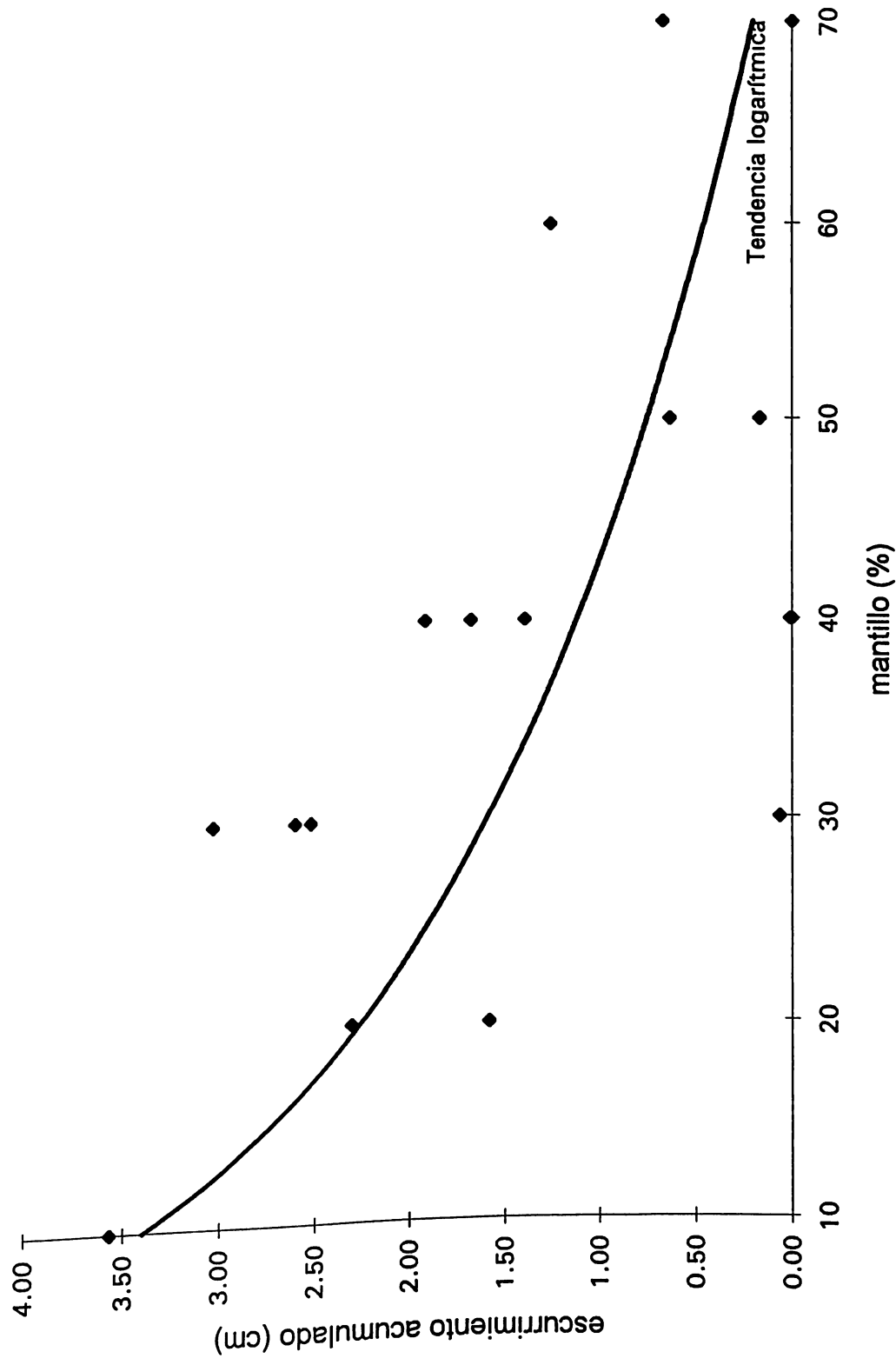


Figura 4.8. Relación entre lámina de escurrimiento y cubierta de mantillo en la Reforestación Zapalinamé

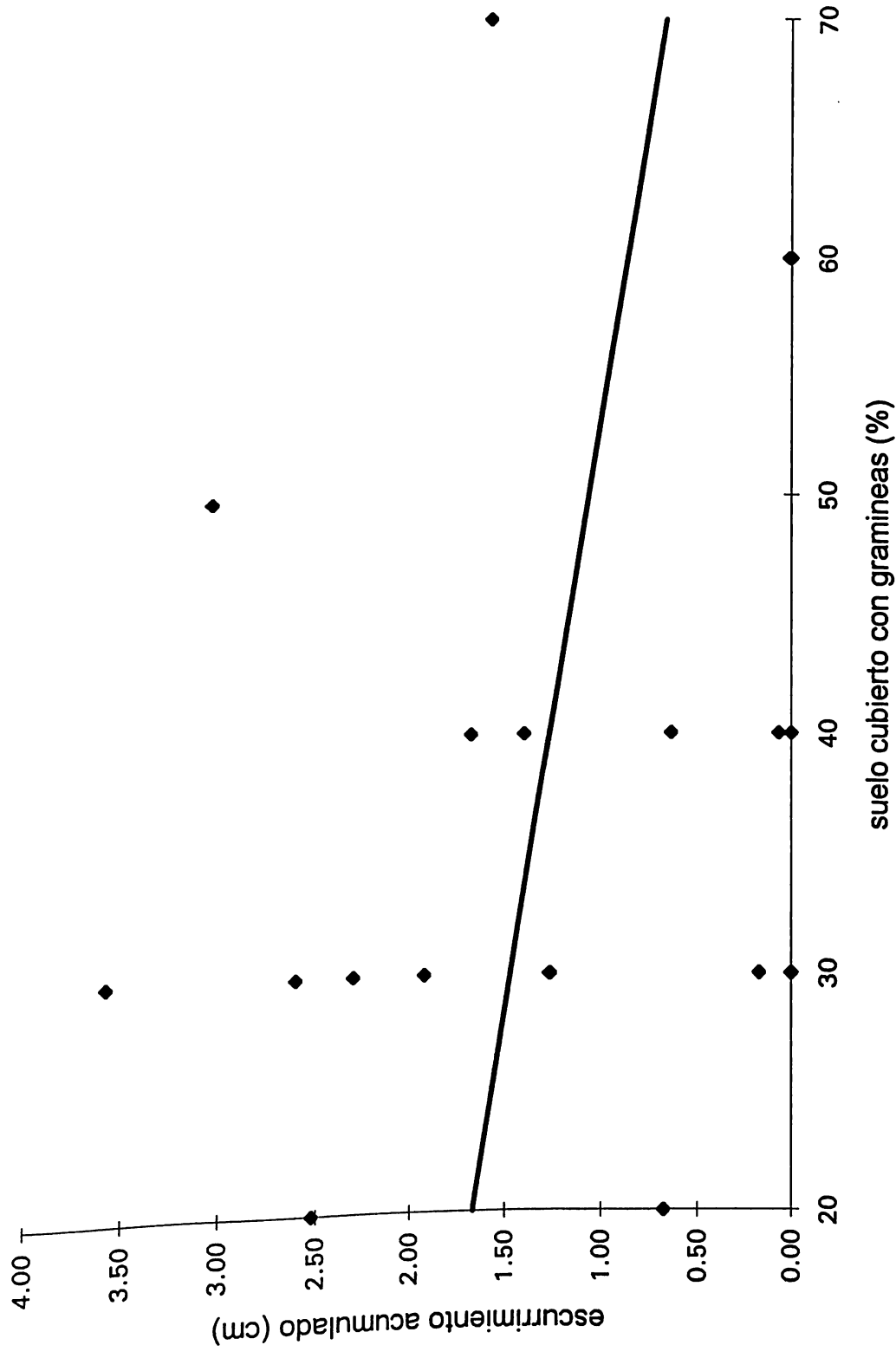


Figura 4.9. Relación entre lámina de escurrimiento y cubierta de gramíneas en la Reforestación Zapalinamé

Con el análisis de correlación múltiple, se determinó que el modelo que se ajusta al escurrimiento en los 30 minutos de estudio, involucra las variables cobertura aérea de gramíneas, cobertura de mantillo, suelo desnudo y grava, de acuerdo a lo expresado en el Cuadro 4.5. El análisis de varianza del modelo se presenta en el Apéndice B.3 donde el valor de la Fc, fue altamente significativo ($p=0.01$), lo cual nos indica que la regresión existe, dado que el valor del coeficiente de regresión es diferente de cero.

Cuadro 4.5. Modelo ajustado para el escurrimiento (cm)

$$L = \alpha + \beta r + \tau m + \delta d + fg + \epsilon$$

Variable independiente	Coeficiente	Error estándar	tc
Intercepto	$\alpha = -11.1478$	4.736631	-2.3535*
Gramíneas (r)	$\beta = 0.1255$	0.049201	2.5523*
Mantillo (m)	$\tau = 0.1061$	0.047825	2.2202*
Suelo desnudo (d)	$\delta = 0.1647$	0.047599	2.4613**
Grava (g)	$f = 0.1585$	0.052991	2.9912**

$$R^2 = 0.777989$$

$$Fc = 11.3889 **$$

$$\text{Cuadrado medio del error} = 0.39811$$

$$\text{Error estándar del modelo} = 0.63096$$

Los valores medios para la lámina de escurrimiento durante los 30 minutos de la prueba de simulación, variaron de 0.558 a 1.685 cm para el sitio I y sitio sin reforestar respectivamente. En la figura 4.10 se muestra la lámina media de escurrimiento acumulado a través del tiempo para los tres sitios bajo estudio.

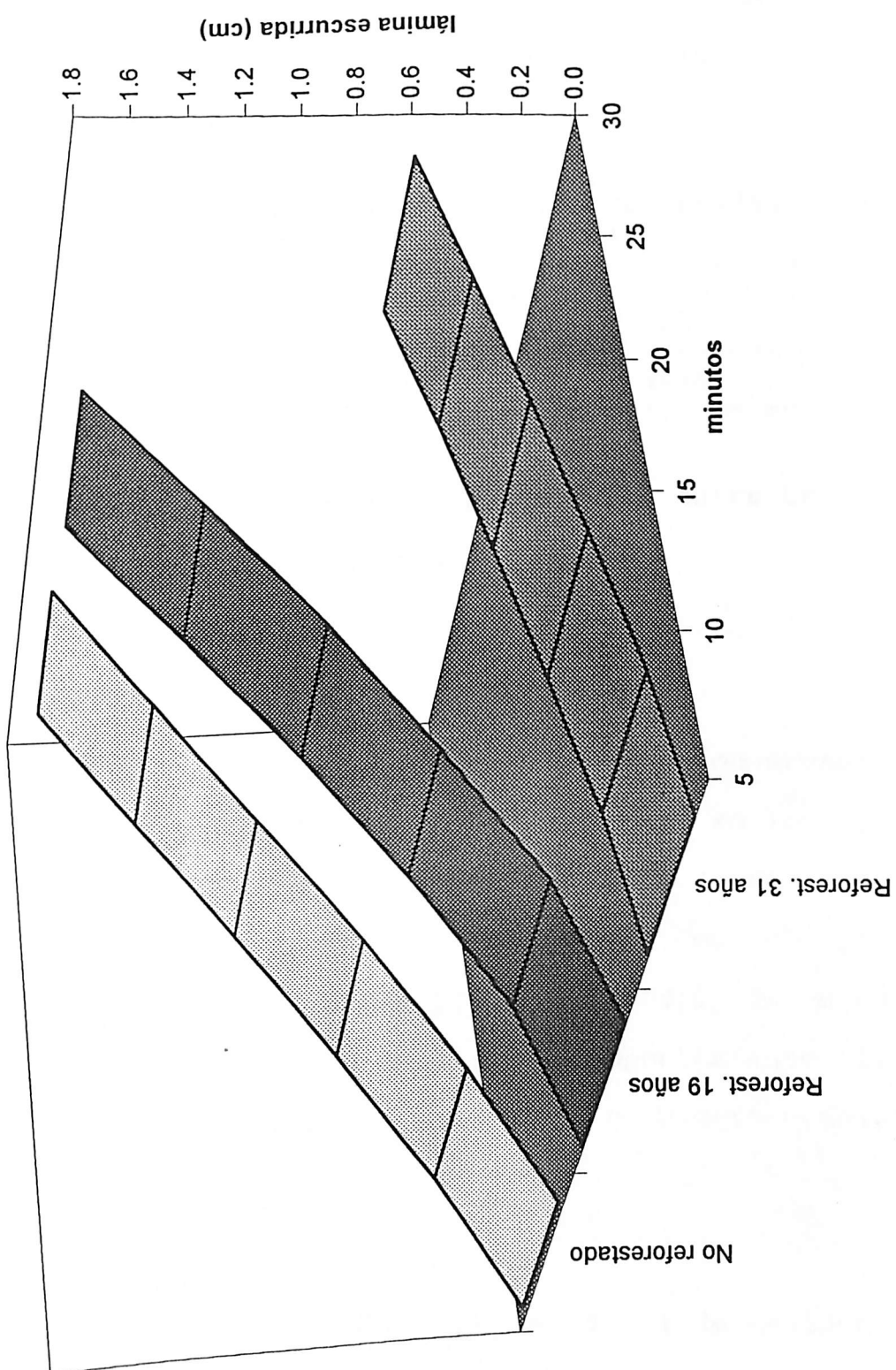


Figura 4.10. Lámina de escurrimiento acumulada a través del tiempo.

Para los datos de esta variable se realizó un ANVA (Apéndice B.9), cuyos resultados con las medias observadas se presentan en el Cuadro 4.6.

CUADRO 4.6. Valor de F y medias observadas para la lámina de escurrimiento (cm)

Medias observadas en los sitios			Fc
I	II	III	
0.5584	1.6589	1.6854	2.029 NS

No se detectaron diferencias entre tratamientos a un nivel de significancia de 0.05.

Erosión

La erosión laminar hídrica observada en campo en cada unidad de muestreo, se aprecia en la figura 4.11, de acuerdo a los datos del Cuadro 4.7. El análisis de regresión lineal nos indica que en el período de aplicación de la lluvia (30 minutos), la erosión como función de tiempo tuvo un comportamiento lineal con ordenada al origen de acuerdo al siguiente modelo:

$$S = \phi t + \epsilon$$

Donde:

S = Erosión o producción total de sedimentos

ϕ = Tasa de erosión (kg/ha/min)

t = tiempo

ϵ = Error muestral

Cuadro 4.7. Erosión laminar hídrica (kg/ha) a través del tiempo (min).

Sitio	minutos					
	5	10	15	20	25	30
Reforest. 31 años	0.00	1.30	2.90	4.57	4.98	5.58
Reforest. 31 años	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
Reforest. 31 años	0.00	2.07	3.76	5.41	7.08	8.86
Reforest. 31 años	0.18	1.55	2.98	4.61	5.98	6.91
Reforest. 31 años	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Reforest. 31 años	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Promedio:	0.03	0.82	1.61	2.44	3.01	3.56
Reforest. 19 años	0.00	0.75	0.79	0.85	2.15	2.78
Reforest. 19 años	0.01	0.03	0.04	0.06	0.55	1.94
Reforest. 19 años	0.00	1.22	2.68	3.30	4.09	5.57
Reforest. 19 años	0.35	7.67	15.18	21.45	28.31	34.55
Reforest. 19 años	0.00	0.00	0.12	0.12	0.12	0.16
Reforest. 19 años	0.00	3.33	6.88	10.48	11.97	14.71
Promedio:	0.06	2.17	4.28	6.04	7.87	9.95
Sin reforestar	0.40	23.50	32.74	82.47	128.04	196.28
Sin reforestar	0.00	5.68	17.56	26.57	33.55	41.34
Sin reforestar	0.00	0.01	0.01	0.01	0.06	0.25
Sin reforestar	8.63	50.17	80.62	101.24	132.56	155.54
Sin reforestar	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sin reforestar	15.95	134.44	208.58	284.62	359.69	418.94
Promedio:	4.16	35.63	56.59	82.49	108.98	135.39

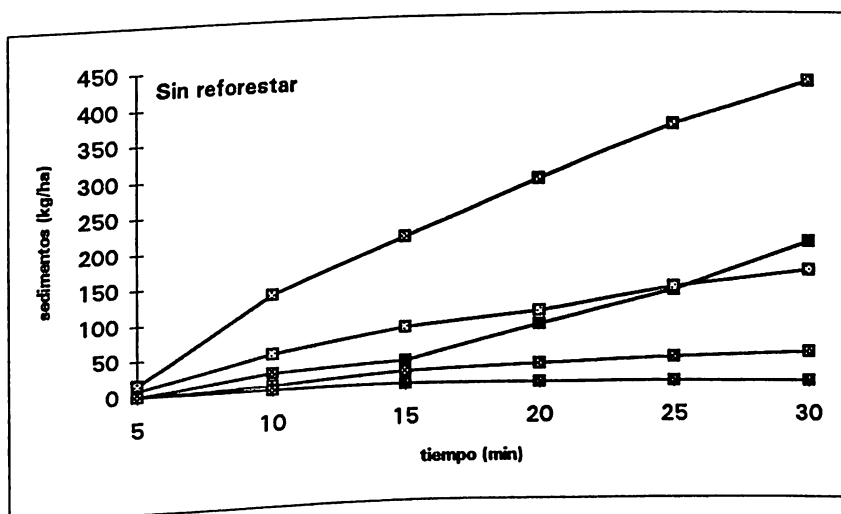
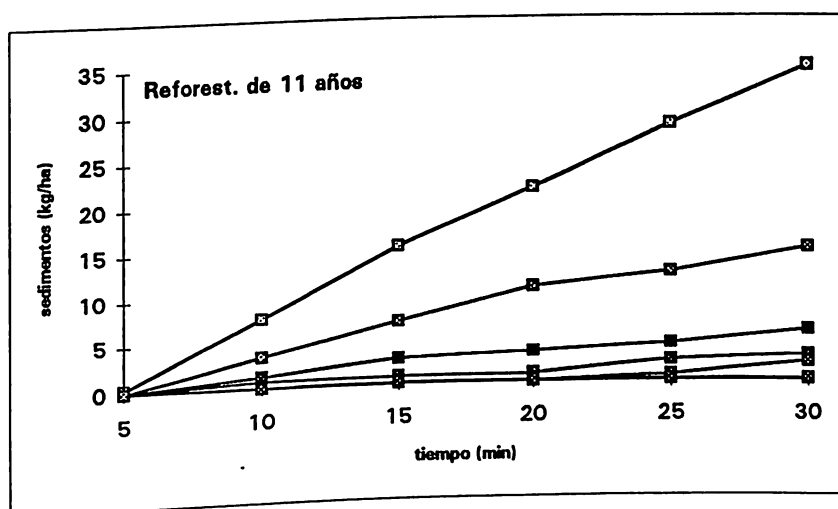
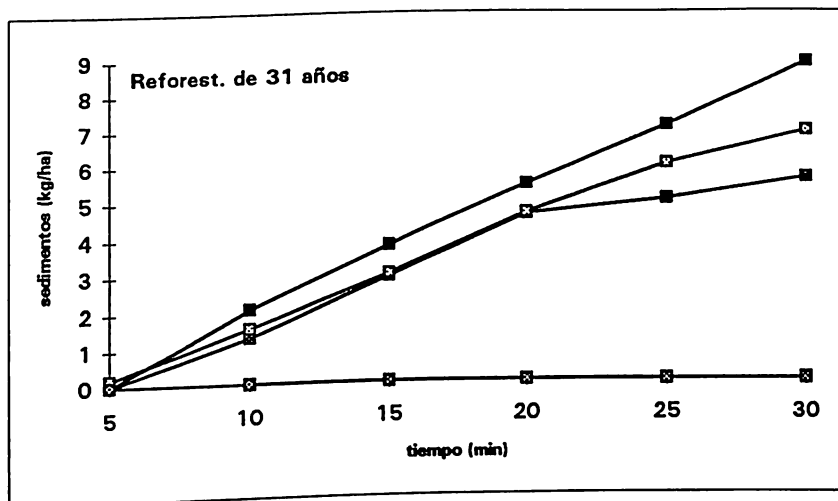


Figura 4.11. Erosión acumulada a través del tiempo.

En el Cuadro 4.8 se presentan las estimaciones de *la pendiente* (ϕ) que representa la tasa de erosión, el coeficiente de determinación (R^2) y la erosión total para los sitios en estudio.

CUADRO 4.8. Valores de la tasa de erosión, erosión total y coeficiente de determinación para el modelo
 $S = \phi t + \epsilon$

SITIO	EROSION TOTAL (kg/ha)	ϕ	R^2
I	5.58	0.1933	0.9781
	0.03	0.0010	0.9670
	8.86	0.2761	0.9835
	6.91	0.2242	0.9853
	0.00	0.0000	1.0000
	0.00	0.0000	1.0000
II	2.78	0.0763	0.9280
	1.94	0.0326	0.5927
	5.57	0.1704	0.9818
	34.55	1.0898	0.9845
	0.16	0.0053	0.9206
	14.71	0.4777	0.9832
III	196.28	5.0404	0.9124
	41.34	1.2882	0.9726
	0.25	0.0042	0.5912
	155.54	5.1689	0.9947
	0.00	0.0000	1.0000
	418.94	13.9805	0.9931

ϕ = Tasa de erosión (kg/ha/min)
 R^2 = Coeficiente de determinación

Tasa de Erosión

De acuerdo al análisis de correlación las variables que más se relacionan con la tasa de erosión son: cobertura aérea total ($r=-0.702$), suelo desnudo ($r=0.702$), velocidad de infiltración ($r=-0.695$), limos mas arenas muy finas ($r=0.620$), cubierta de mantillo ($r=-$

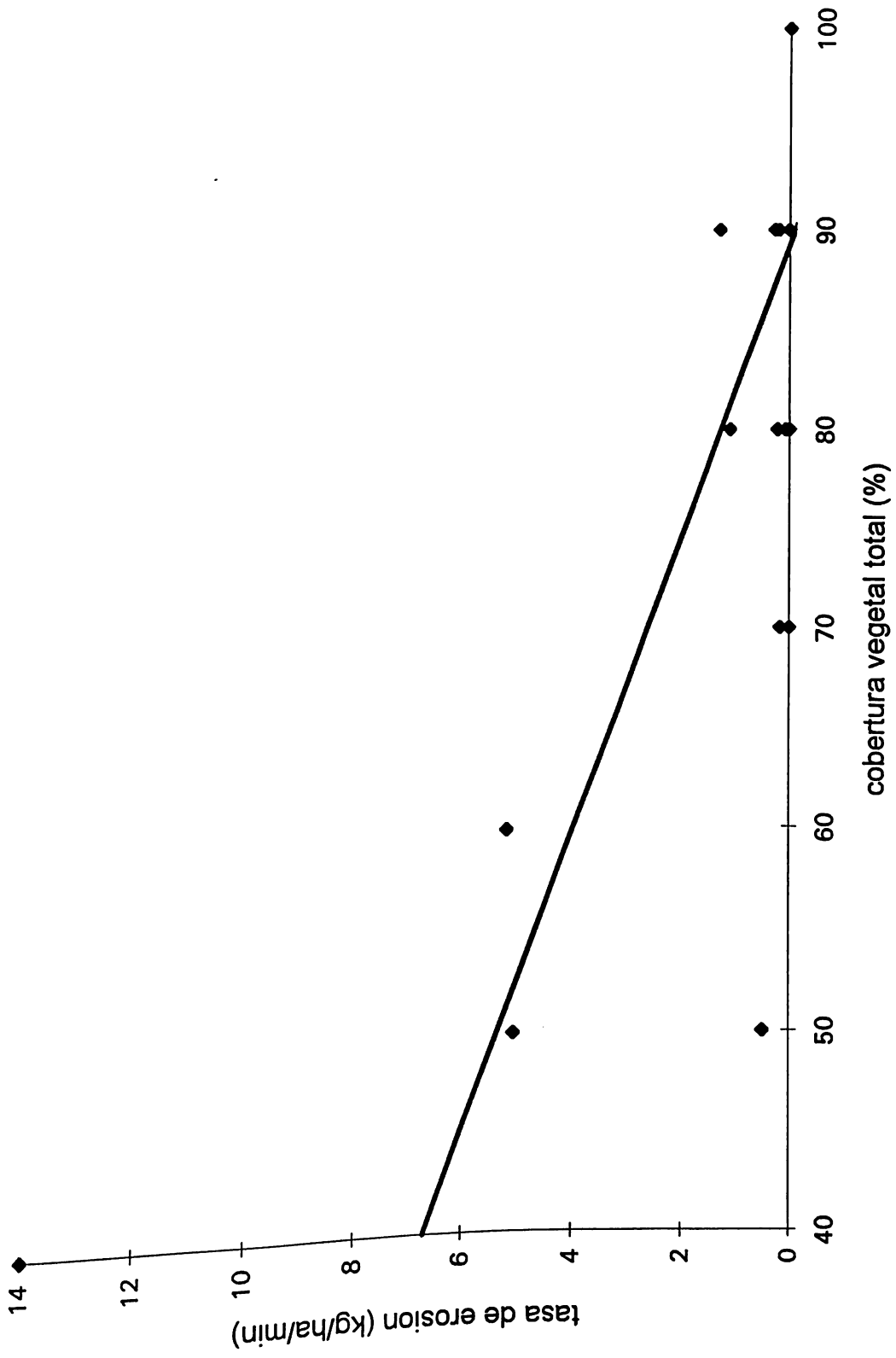


Figura 4.12. Relación entre tasa de erosión y cobertura vegetal en la Reforestación Zapalinamé

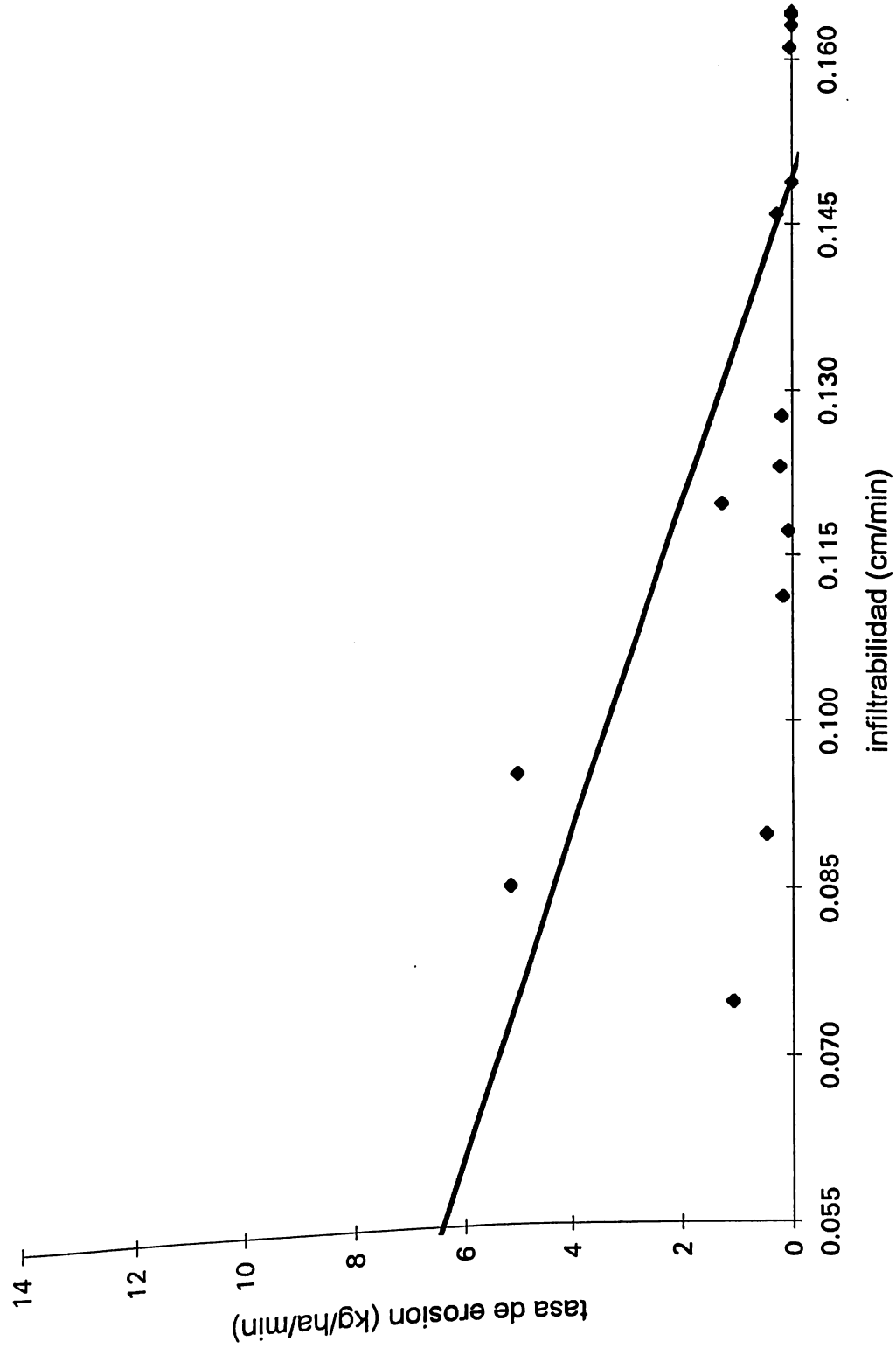


Figura 4.13. Relación entre tasa de erosión e infiltrabilidad en la Reforestación Zapalinamé

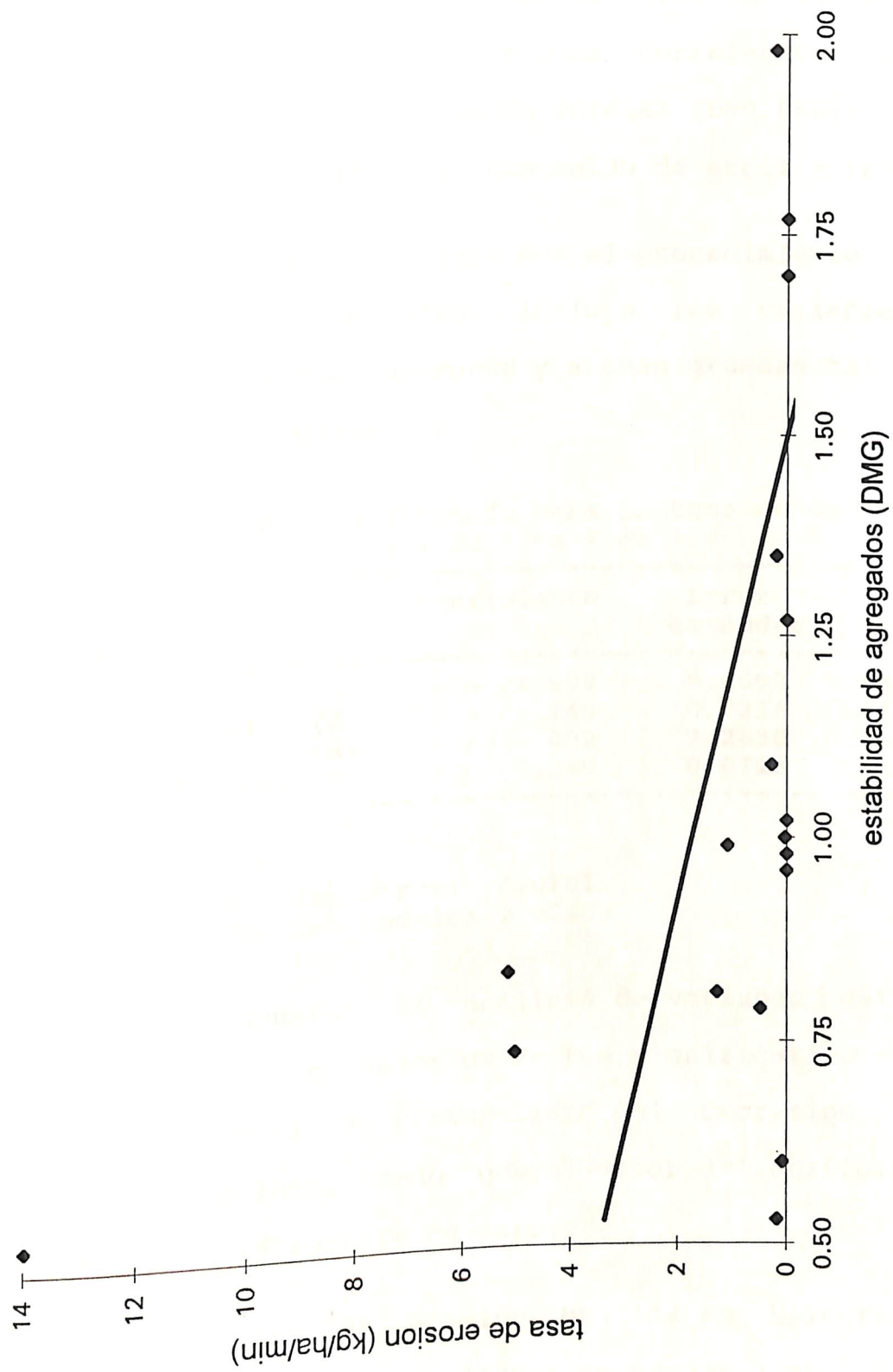


Figura 4.15. Relación entre tasa de erosión y estabilidad de agregados en la Reforestación Zapalinamé

0.607), arenas gruesas ($r=-0.553$) y la estabilidad de agregados ($r=-0.417$); algunas de estas relaciones se muestran en las figuras de la 4.12 a la 4.15; las variables que presentaron poca correlación fueron la pendiente ($r=0.001$), humedad inicial ($r=0.060$), densidad aparente ($r = 0.017$) y el contenido de arcilla ($r=-0.122$).

El modelo obtenido por el procedimiento Stepwise para la tasa de erosión, incluye las variables suelo desnudo, densidad aparente y arenas gruesas tal como se aprecia en el Cuadro 4.9.

Cuadro 4.9. Modelo ajustado para la tasa de erosión
 $TE = \alpha + \beta d + \tau a + \delta n + \epsilon$

Variable independiente	Coefficiente	Error estándar	tc
Intercepto	$\alpha = 24.999$	9.0093	2.775*
Suelo desnudo (d)	$\beta = 0.143$	0.0316	4.524**
Dens. aparente (a)	$\tau = -12.092$	7.2530	-1.667ns
Arenas gruesas (n)	$\delta = -0.240$	0.0713	-3.367**

$R^2 = 0.728651$

Fc = 12.5313 **

Cuadrado medio del error: 4.0161

Error estándar del modelo: 2.00403

De acuerdo al análisis de varianza del modelo (Apéndice B.4), el valor de Fc fue significativo mas allá del nivel 0.01 de probabilidad del error tipo I y la regresión existe, dado que el valor del coeficiente de regresión es diferente de cero.

La tasa de erosión obtenida en kilogramos por hectárea por minuto de lluvia se presenta en el Cuadro 4.10 para cada uno de los sitios muestreados.

Cuadro 4.10. Tasa de erosión (kg/ha/min)

MUESTRA	SITIO I	SITIO II	SITIO III
1	0.1933	0.0763	5.0404
2	0.0010	0.0326	1.2882
3	0.2761	0.1704	0.0042
4	0.2242	1.0898	5.1689
5	-	0.0053	-
6	-	0.4776	13.9805

Estos valores fueron sometidos a un análisis de varianza (Apéndice B.10) cuyo valor de F calculada así como las medias observadas se presentan en el siguiente Cuadro.

Cuadro 4.11. Valor de F y medias observadas para la tasa de erosión (kg/ha/min)

Medias observadas en los sitios			Fc
I	II	III	
0.116	0.309	4.247	3.446

Se encontraron diferencias entre tratamientos a un nivel de significancia de 0.058 que no rebasan el nivel de significancia fijado previamente (0.05).

Erosión Total

De acuerdo al análisis de correlación, las variables que más se relacionaron con la erosión total fueron la presencia de arenas gruesas ($r = -0.81$), arenas finas mas limo ($r=0.782$), cobertura total ($r=-0.729$), suelo desnudo ($r=0.728$), infiltrabilidad ($r=-0.698$), cobertura del mantillo ($r=-0.647$) y estabilidad de

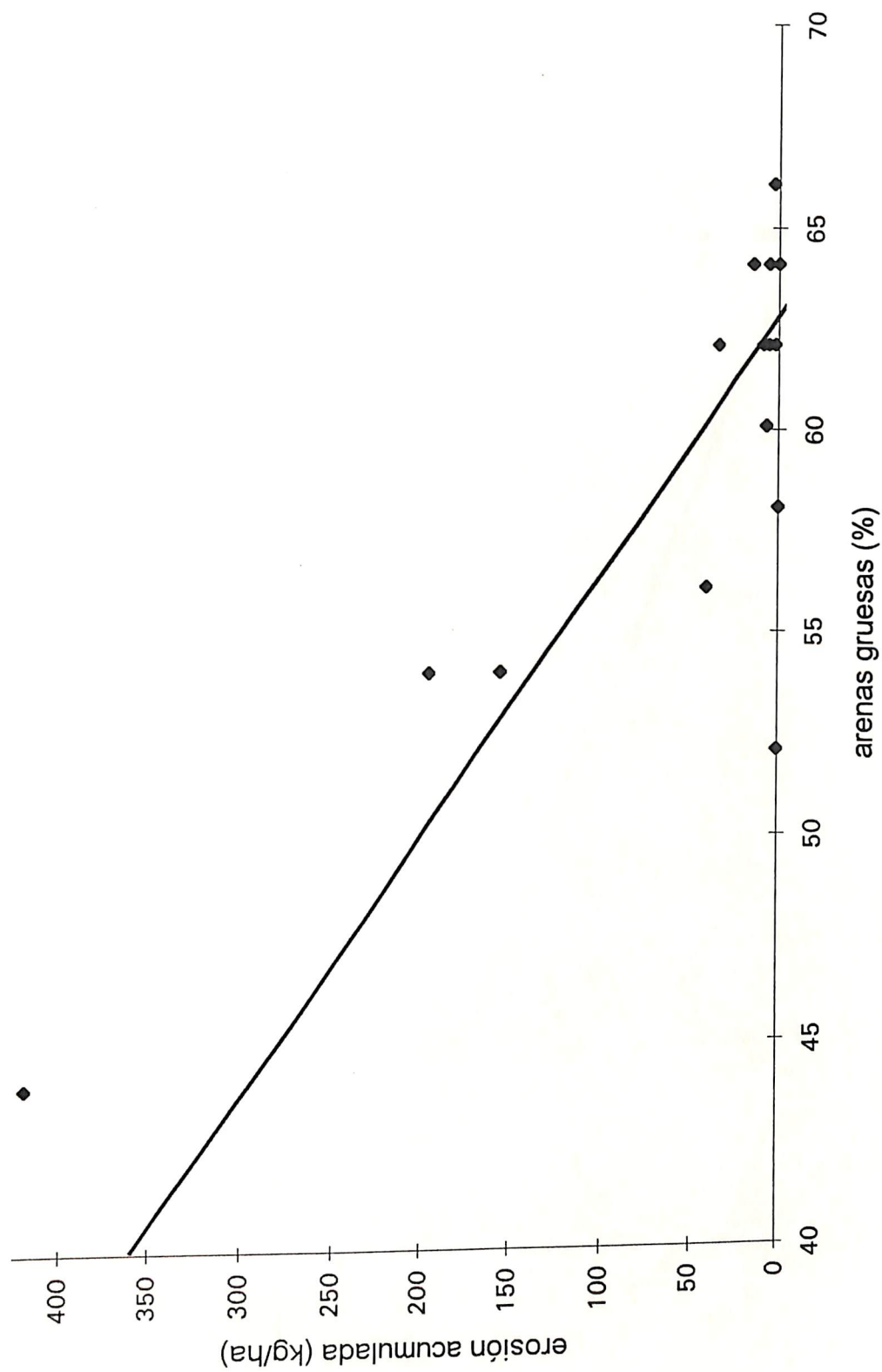


Figura 4.16. Relación entre la erosión y el contenido de arenas gruesas en la Reforestación Zapalinamé

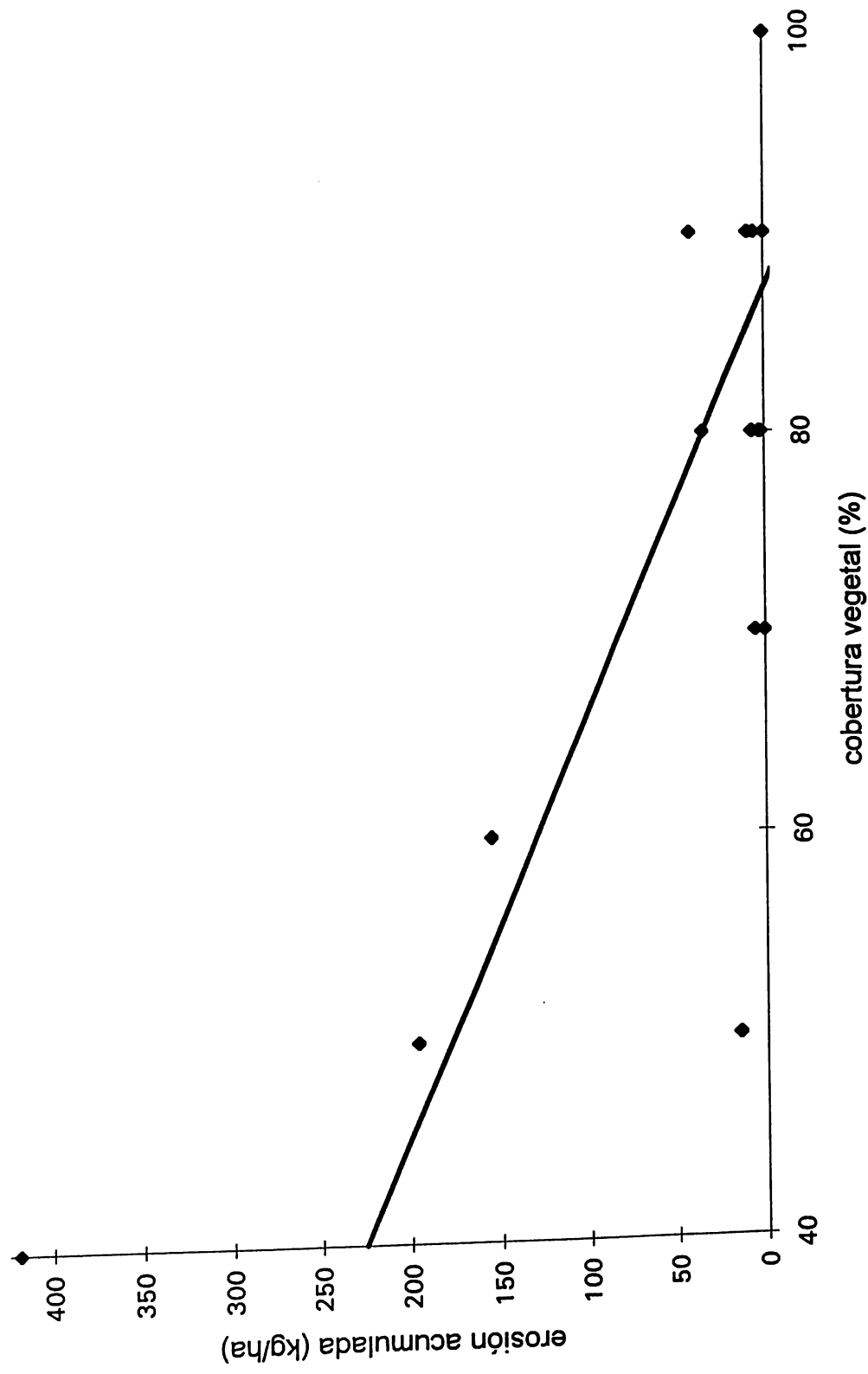


Figura 4.17. Relación entre erosión y cubierta vegetal en la Reforestación Zapalinamé

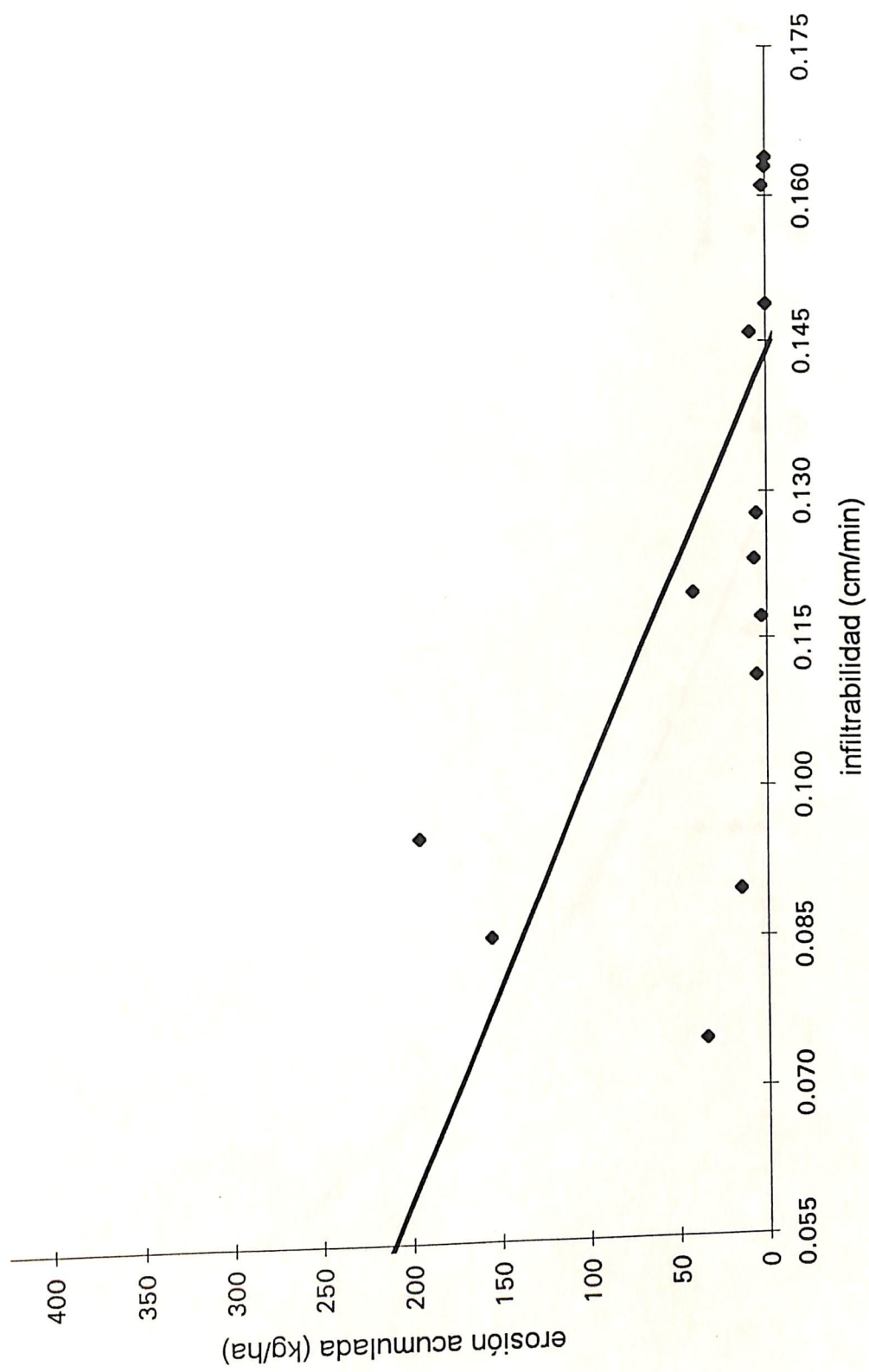


Figura 4.18. Relación entre erosión e infiltrabilidad en la Reforestación Zapalinamé

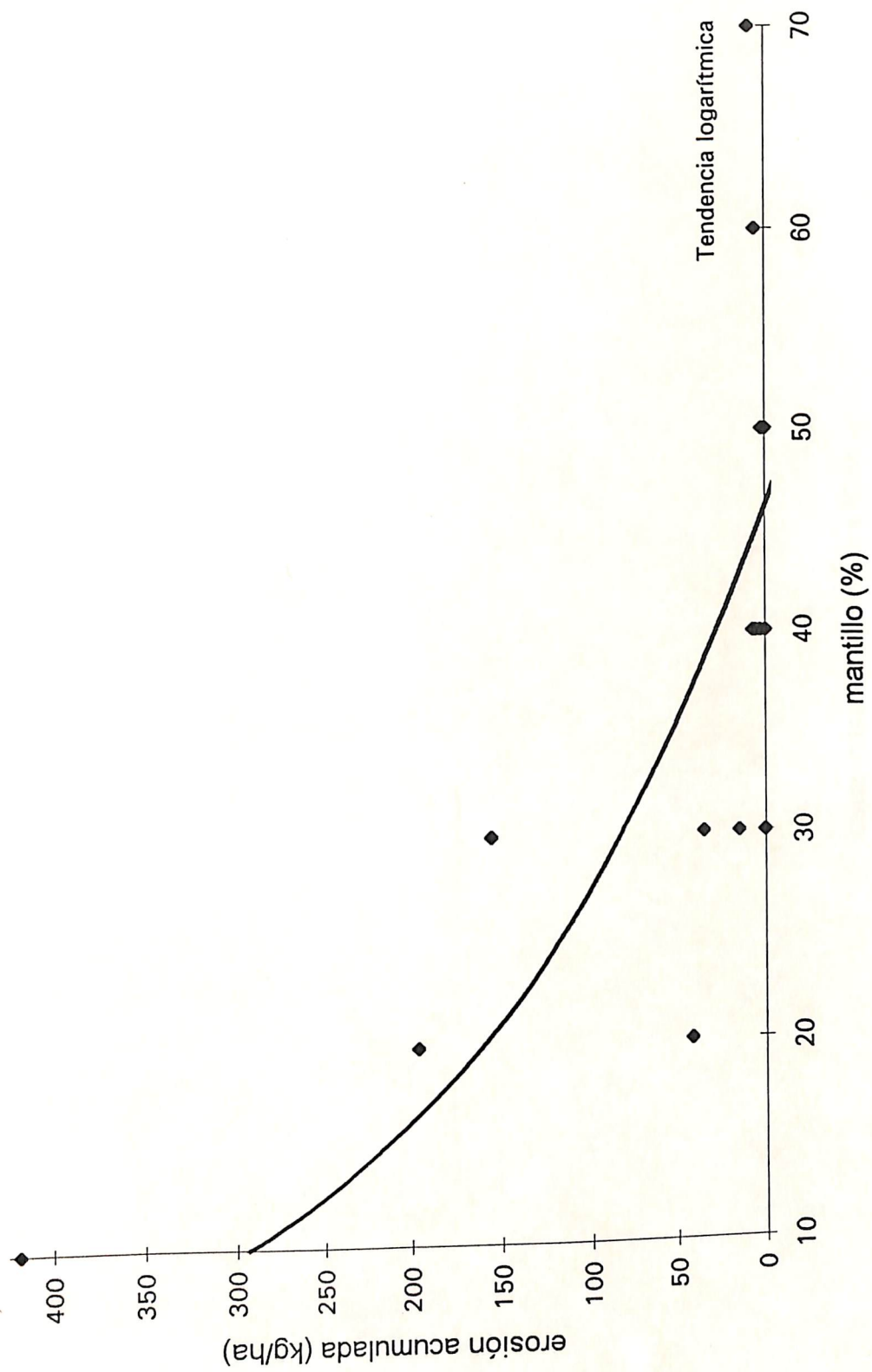


Figura 4.19. Relación entre erosión y cubierta de mantillo en la Reforestación Zapalinamé

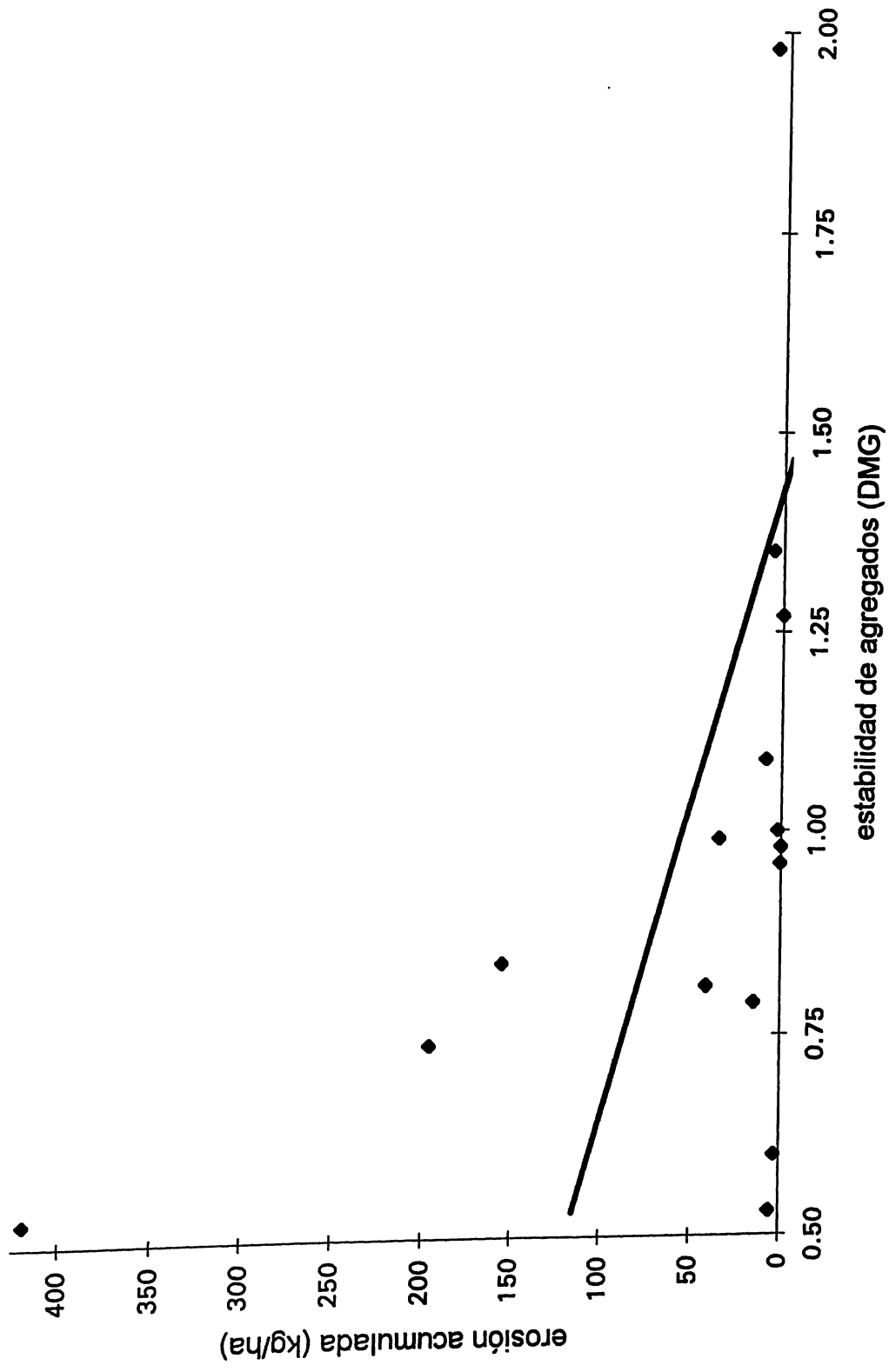


Figura 4.20. Relación entre erosión y estabilidad de agregados en la Reforestación Zapalinamé

agregados ($r=-0.409$); algunas de estas relaciones pueden observarse en las figuras 4.16 a 4.20. Las variables que tuvieron menor relación fueron la pendiente ($r=0.006$), humedad inicial ($r=0.048$) y densidad aparente ($r=0.080$).

El modelo obtenido para la erosión total involucra sólo dos variables: suelo desnudo y arenas gruesas, de acuerdo al Cuadro 4.12; el análisis de varianza del modelo (Apéndice B.5) indica que el valor de F_c fue significativo más allá del nivel 0.01 de probabilidad del Error tipo I y la regresión existe (coeficiente de regresión diferente de cero).

Cuadro 4.12. Modelo ajustado para la erosión total en los sitios donde hubo escurrimiento
 $PS = \alpha + \beta d + \tau n + \epsilon$

Variable independiente	Coeficiente	Error estándar	tc
Intercepto	$\alpha = 689.212$	165.739	4.158**
Suelo desnudo (d)	$\beta = 3.299$	0.992	3.327**
Arenas gruesas (n)	$\tau = -11.809$	2.665	-4.432**

$R^2 = 0.8218$

$F_c = 27.6798$ **

Cuadrado Medio del Error = 2795.9

Error Estándar del modelo = 52.876

Los resultados de erosión total (kg/ha) registrados en los sitios en estudio (sólo en los que se registró escurrimiento; ver Cuadro 4.8), se sometieron a un análisis de varianza (Apéndice B.11); los resultados indican que existen diferencias significativas mas allá del nivel 0.05 para erosión total, en los tratamientos bajo estudio (Cuadro 4.13).

Cuadro 4.13. Valor de F y medias observadas para la erosión total (kg/ha)

Medias observadas en los sitios			
I	II	III	Fc
5.34a	9.95a	162.47b	4.381*
Valores con distinta literal difieren estadísticamente (Tukey, 0.05)			

Utilizando pruebas de medias (Tukey, 0.05), fue posible identificar que la erosión total es estadísticamente diferente entre el sitio sin reforestar y los dos sitios reforestados y que éstos últimos son estadísticamente similares entre sí, tal como se aprecia en la figura 4.21.

Erosión Inicial

En quince de los 18 sitios muestreados se presentó escurrimiento y erosión (producción de sedimentos). De los quince, sólo dos incrementaron la erosión durante el transcurso de la simulación de lluvia; en los trece sitios restantes, la erosión fue mayor durante los primeros diez minutos de la prueba (erosión inicial) y posteriormente se mantuvo relativamente estable de los 20 a los 30 minutos.

Las variables que mas se relacionaron con la erosión inicial fueron: presencia de arenas gruesas ($r = -0.748$), limo mas arenas finas ($r = 0.653$), infiltrabilidad ($r = -0.645$), cobertura aérea total ($r = -0.565$), cubierta de mantillo ($r = -0.504$) y suelo desnudo ($r = 0.461$);

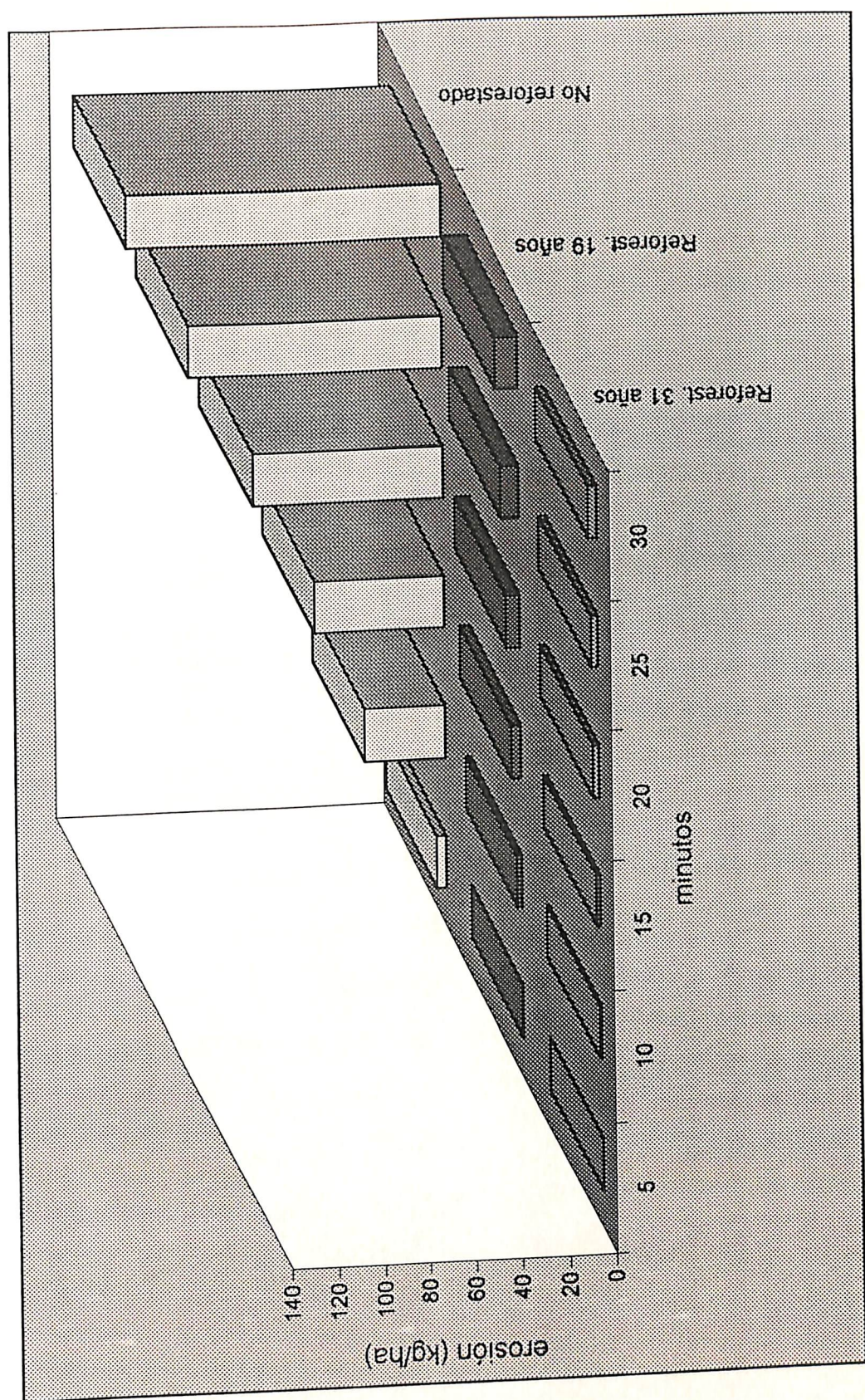


Figura 4.21. Erosión laminar hídrica media a través del tiempo en la Reforestación Zapalinamé

algunas de estas relaciones se presentan en las figuras 4.22 a 4.24; las variables que menos se relacionaron fueron: humedad inicial ($r=0.017$), densidad aparente ($r=-0.079$), arcilla ($r=0.102$) y pendiente ($r=-0.079$).

El modelo de mejor ajuste para erosión inicial en relación al escurrimiento se muestra en el Cuadro 4.14.

Cuadro 4.14. Modelo ajustado para erosión inicial en relación a lámina de escurrimiento (kg/ha/cm)
 $\beta = \alpha + \beta n + \epsilon$

Variable Independiente	Coefficiente	Error estándar	tc
Intercepto	$\alpha = 485.179$	110.807	4.378**
Arenas gruesas (n)	$\beta = -7.650$	1.884	-4.061**

$$R^2 = 0.5592$$

$$F_c = 16.4894 **$$

$$\text{Cuadrado Medio del Error} = 1756.8$$

$$\text{Error estándar del modelo} = 41.9$$

El valor de F_c fue significativo mas allá del nivel 0.01 (Apéndice B.6); la regresión existe dado que el coeficiente de regresión es diferente de cero. En el Cuadro 4.15 se presentan los datos ajustados para erosión inicial en relación al escurrimiento (kg/ha/cm), de acuerdo al modelo obtenido para el comportamiento de la erosión acumulada a partir del primer intervalo de tiempo en el que se registró escurrimiento.

De acuerdo al análisis de varianza (Apéndice B.12), existen diferencias entre tratamientos para la erosión inicial (Cuadro 4.16).

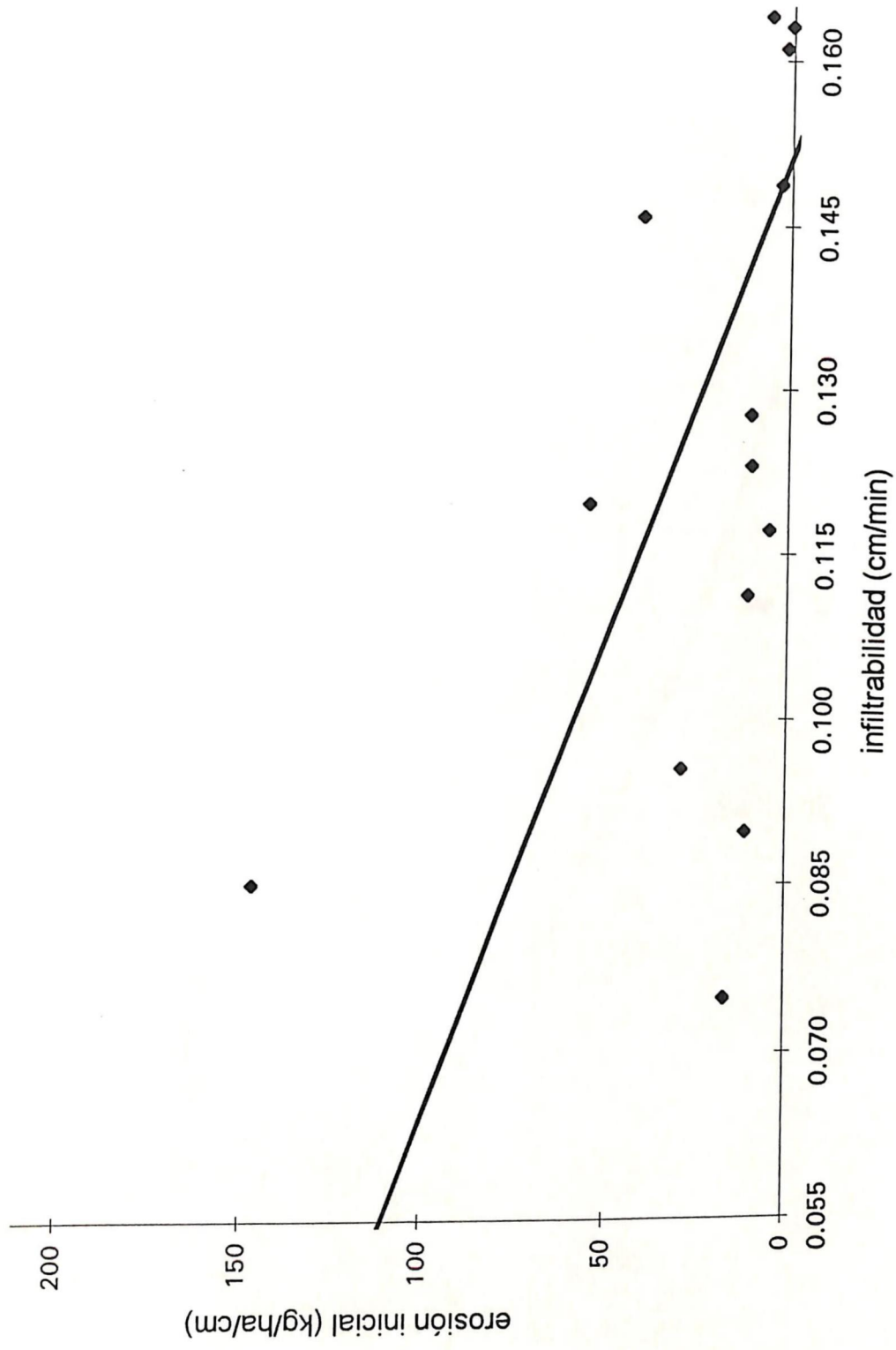


Figura 4.22. Relación entre erosión inicial e infiltrabilidad en la Reforestación Zapalinamé

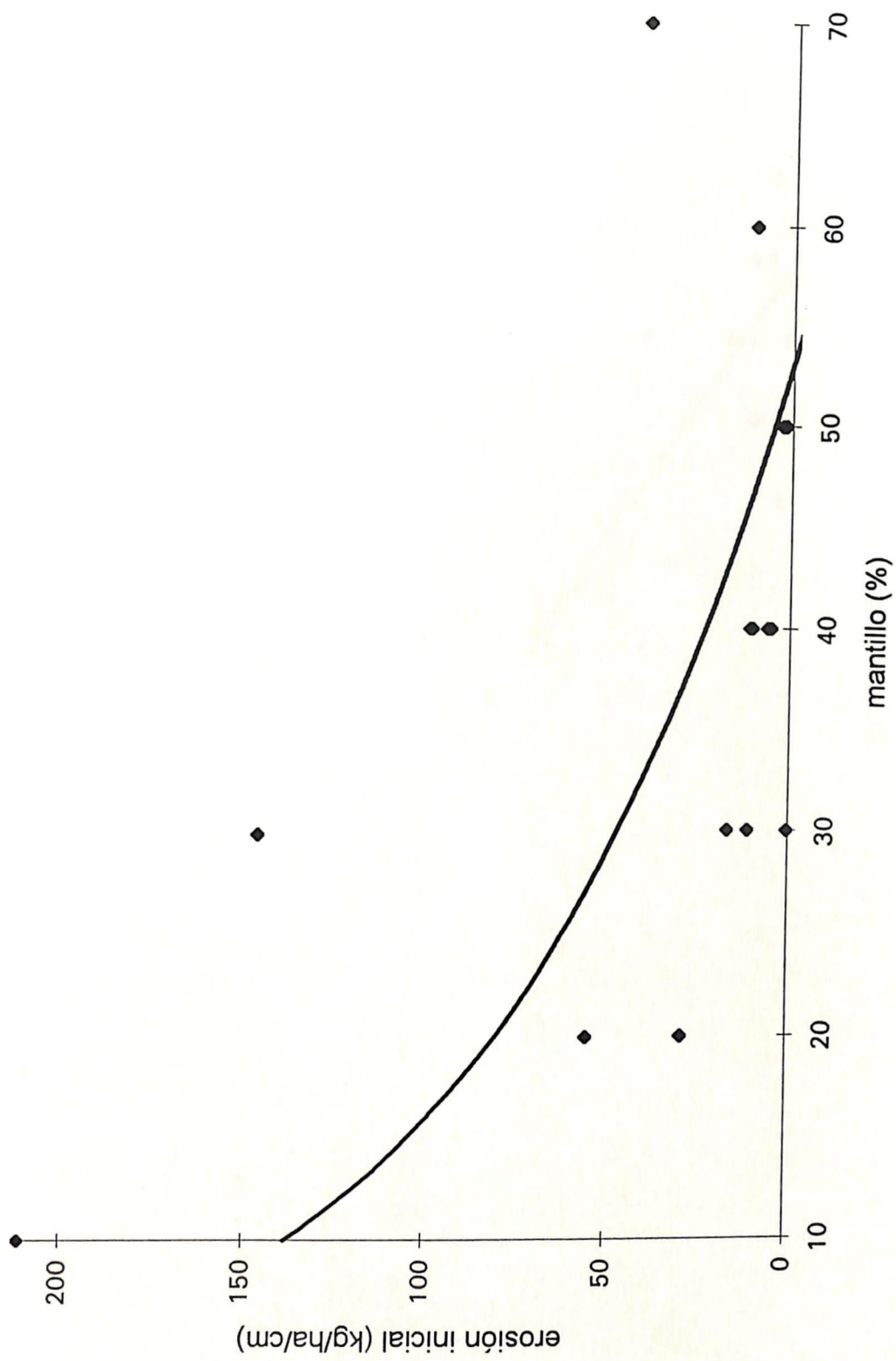


Figura 4.23. Relación entre erosión inicial y cubierta de mantillo en la Reforestación Zapalinamé

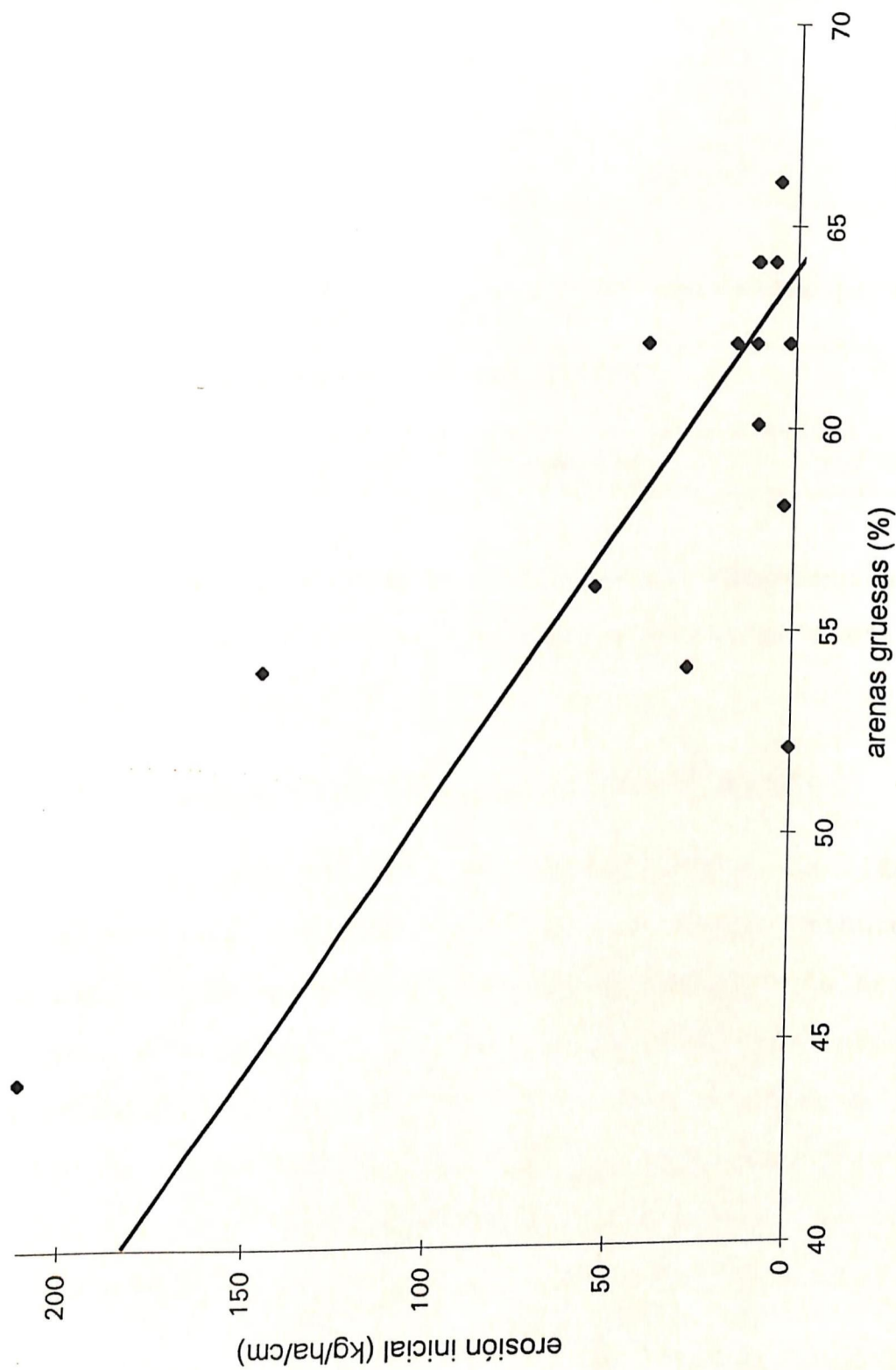


Figura 4.24. Relación entre erosión inicial y arenas gruesas en la Reforestación Zapalinamé

Cuadro 4.15. Tasa de erosión inicial en relación a la lámina de escurrimiento (kg/ha/cm).

MUESTRA	I	II	III
1	10.506	5.157	29.255
2	6.140	1.823	55.297
3	41.503	11.019	0.365
4	10.363	16.709	147.167
5	-	2.812	-
6	-	11.127	211.295

Cuadro 4.16. Valor de Fc y medias observadas para erosión inicial (kg/ha/cm)

Medias observadas en los sitios			Fc
I	II	III	
17.153	8.108	88.676	3.753

Se encontraron diferencias estadísticas entre tratamientos a un nivel de significancia de 0.054 que no rebasan el nivel 0.05.

Erosión Acumulada en Relación al Escurrimiento

La erosión al ser relacionada a la lámina de escurrimiento en cada período de cinco minutos, se estabilizó después de 20 minutos de iniciada la prueba en trece de las quince unidades de muestreo que presentaron producción de sedimentos, tal como se aprecia en las figuras 4.25 y 4.26; la erosión acumulada en relación al escurrimiento, tuvo un comportamiento lineal, de acuerdo a la información que se presenta en el Cuadro 4.17.

Las variables que mas se relacionaron con la erosión acumulada por lámina de escurrimiento fueron:

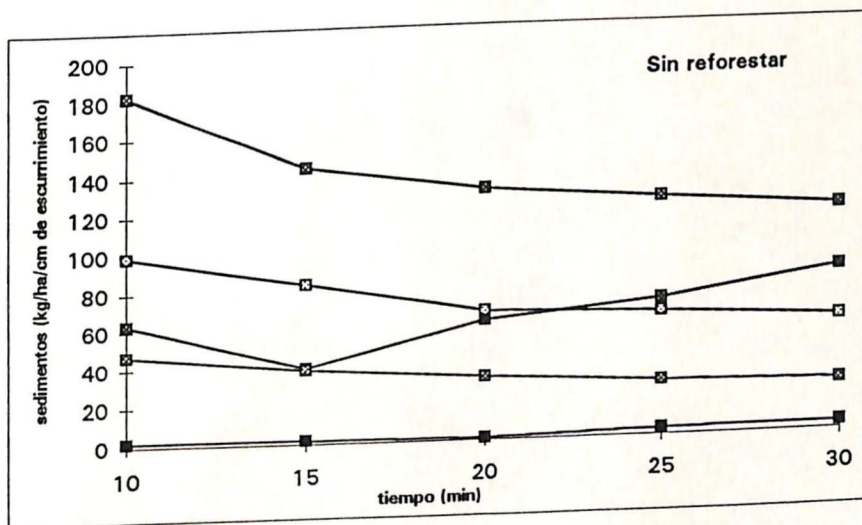
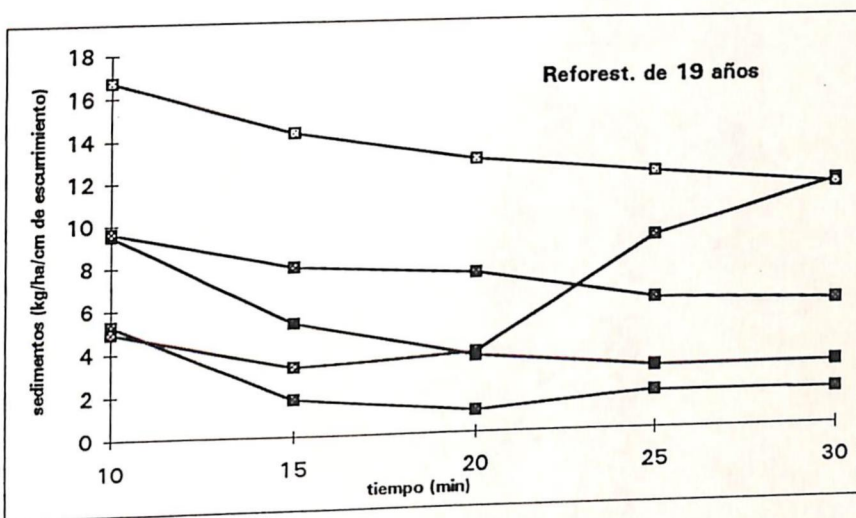
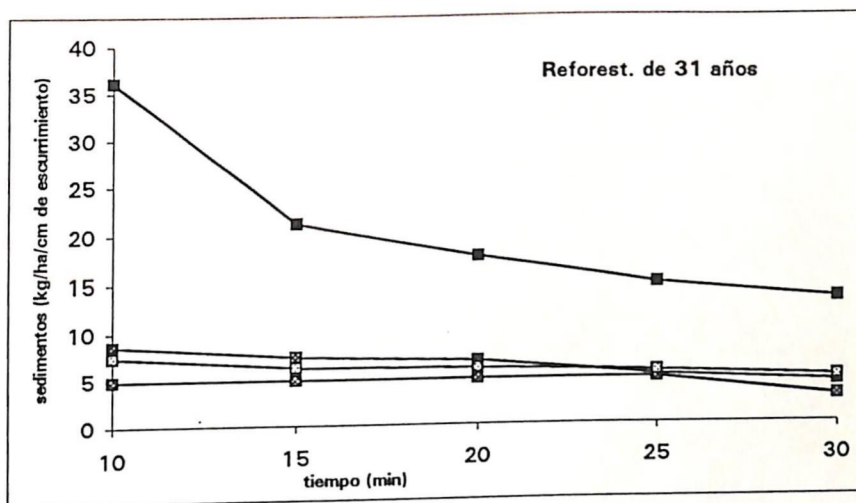


Figura 4.25. Erosión acumulada por lámina de escurrimiento

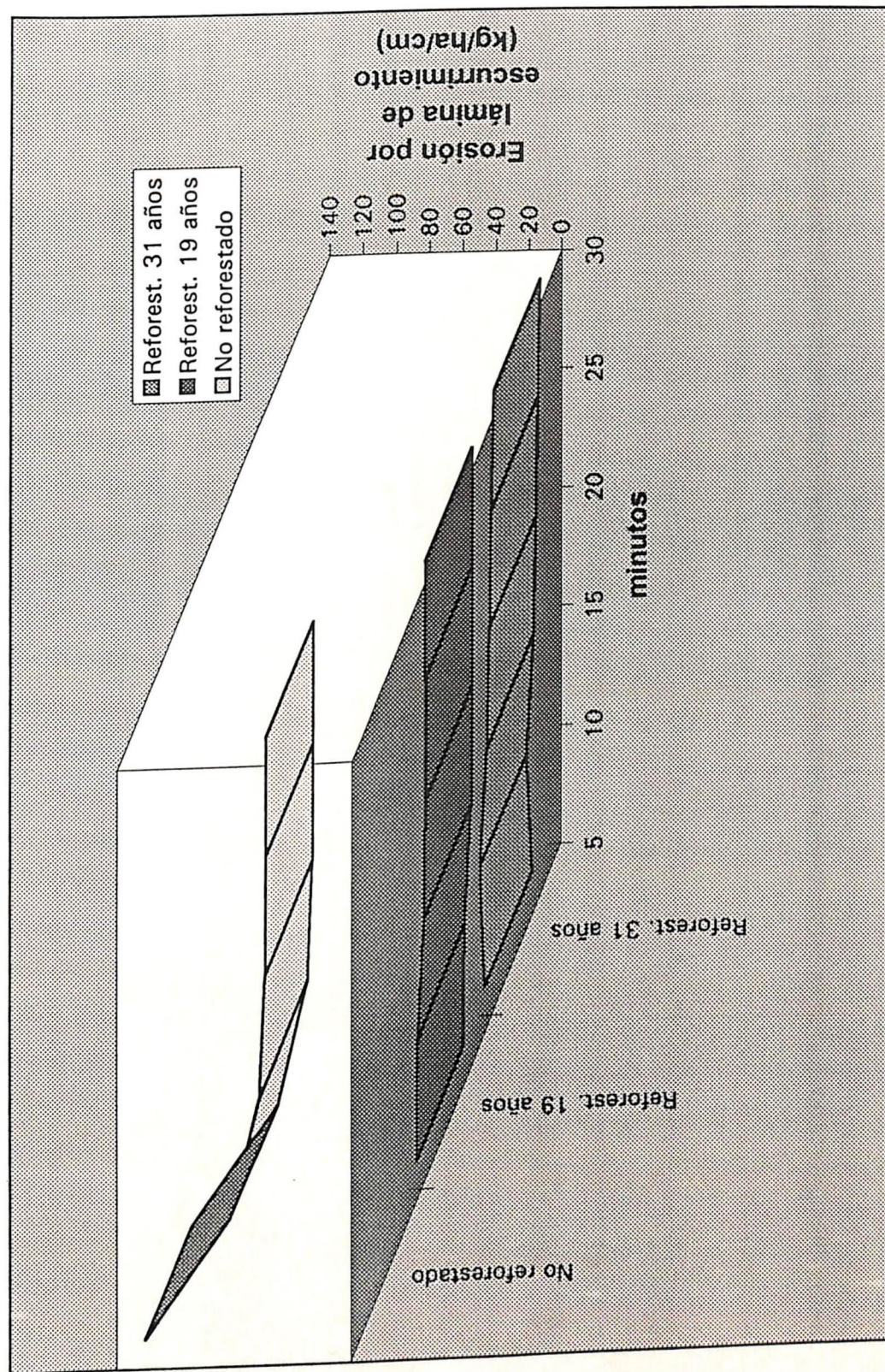


Figura 4.26. Erosión acumulada en relación al escurrimiento a través del tiempo en la Reforestación Zapalinamé

Cuadro 4.17. Erosión acumulada por lámina de escurrimiento (kg/ha/cm de escurrimiento).

sítio	5	10	15	20	25	30	$\hat{a}$	β°	R ²
Reforest. 31 años		8.5605	7.2938	6.7306	5.1513	4.4122	10.6053	-0.2088	0.9833
Reforest. 31 años		4.9020	4.9020	4.9020	4.9020	2.8382	6.1402	-0.0825	0.5000
Reforest. 31 años		36.1320	21.0940	17.5581	14.6721	13.1050	41.5026	-1.0495	0.8051
Reforest. 31 años	10.8761	7.3781	6.2248	5.9649	5.5648	4.9382	10.3635	-0.2022	0.7791
Reforest. 31 años									
Reforest. 31 años									
Reforest. 19 años		5.2595	1.7162	1.0096	1.7065	1.6547	5.1570	-0.1444	0.4521
Reforest. 19 años	5.2356	4.9100	3.2051	3.6810	9.0371	11.5607	1.8233	0.2542	0.5171
Reforest. 19 años		9.4868	5.2360	3.5407	2.8862	2.9010	11.0187	-0.3104	0.7769
Reforest. 19 años	14.4688	16.7336	14.2955	12.8406	12.0907	11.4063	16.7088	-0.1754	0.7192
Reforest. 19 años			1.7140	0.5747	0.2789	0.2518	2.8120	-0.0936	0.7709
Reforest. 19 años		9.6154	7.9000	7.4421	6.0810	5.8350	11.1266	-0.1876	0.9414
Sin reforestar	34.5125	63.1856	39.4320	62.6353	71.2144	85.3065	29.2551	1.7215	0.6995
Sin reforestar		46.9577	38.6316	32.5047	28.2122	26.1632	55.2972	-1.0402	0.9481
Sin reforestar		1.9646	1.9646	1.0471	3.0395	3.9664	0.3651	0.1016	0.5085
Sin reforestar	154.0521	99.0035	83.7549	67.3273	64.7060	59.7948	147.1671	-3.3749	0.7951
Sin reforestar									
Sin reforestar	202.0522	182.3657	144.2073	130.8020	124.0670	117.4304	211.2951	-3.4938	0.9063

$\hat{a}$ y β° son la tasa inicial y la tasa de disminución en la producción de sedimentos por centímetro de escurrimiento estimadas conforme al modelo $S = a + \beta t + e$

Donde: S es la producción de sedimentos por centímetro de escurrimiento

t es el tiempo

e es el error muestral

presencia de arenas gruesas ($r=-0.803$), limos mas arenas finas ($r=0.723$), suelo desnudo ($r=0.721$), velocidad de infiltración ($r=-0.654$), cobertura de mantillo ($r=-0.640$), fitomasa aérea ($r=-0.536$) y estabilidad de agregados ($r=-0.404$). Las variables que tuvieron poca relación fueron: contenido de arcilla ($r=0.072$), pendiente del terreno ($r=0.073$) y humedad inicial ($r=0.091$).

El modelo obtenido con el análisis de regresión múltiple para la erosión acumulada en relación al escurrimiento, involucra dos variables: suelo desnudo y arenas gruesas (Cuadro 4.18); El valor de Fc del modelo fue significativo más allá del nivel 0.01 (Apéndice B.7).

Cuadro 4.18. Modelo ajustado para la erosión acumulada por lámina de escurrimiento (kg/ha/cm)
 $B = \alpha + \beta d + \tau n + \epsilon$

Variable Independiente	Coefficiente	Error estándar	tc
Intercepto	$\alpha = 214.019$	52.986	4.039**
Suelo desnudo (d)	$\beta = 1.001$	0.317	3.156**
Arenas gruesas (n)	$\tau = -3.575$	0.852	-4.195**

$$R^2 = 0.8055$$

$$Fc = 24.8578 **$$

$$\text{Cuadrado Medio del Error} = 285.76$$

$$\text{Error estándar del modelo} = 16.90$$

En el Cuadro 4.19 se presentan los valores de erosión acumulada por centímetro de lámina escurrida que se observaron, en campo una vez que se concluyó la prueba de simulación; corresponden a la erosión total entre la lámina total de escurrimiento registrada en cada unidad experimental.

CUADRO 4.19. Erosión acumulada por lámina de escurrimiento (kg/ha/cm).

MUESTRA	SITIO I	SITIO II	SITIO III
1	4.412	1.655	85.307
2	2.838	11.560	26.163
3	13.105	2.901	3.966
4	4.938	11.406	59.795
5	-	0.252	-
6	-	5.835	117.430

El análisis de varianza para erosión acumulada en relación al escurrimiento (Apéndice B.13) detectó diferencias altamente significativas entre tratamientos, presentando menor erosión los sitios reforestados que el sitio sin reforestar (Cuadro 4.20).

Cuadro 4.20. Valor de Fc y medias observadas para la erosión acumulada en relación al escurrimiento (kg/ha/cm)

Medias observadas en los sitios			Fc
I	II	III	
6.323a	5.601a	58.532b	6.601*

Valores con literal distinta, difieren estadísticamente (Tukey, 0.05)

Erosionabilidad del Suelo (K)

La erosionabilidad del suelo (factor K) varió de 0.0001 a 0.0188 tonhahr/haMJmm, que corresponden respectivamente a los valores mas bajos (unidad de muestreo 5 del sitio I) y altos (unidad de muestreo 6 del sitio III) de erosión encontrados en el estudio.

De acuerdo al análisis de correlación, la relación que existe entre la erosionabilidad y las variables dependientes consideradas en este estudio es significativa mas allá del nivel 0.01; las principales características de estas relaciones se presentan en el Cuadro 4.21.

Cuadro 4.21. Valor de los coeficientes de la recta para la relación entre erosionabilidad y las variables dependientes

VARIABLE DEPEND.	INTERCEPTO (a)	COEFICIENTE REGRESION (b)	COEFICIENTE CORRELACION (r)
I	10.060	-0.3169	-0.8060
E	1.660	1.3689	0.7487
ET	-71.456	15.4580	0.7786
TE	-2.258	0.4871	0.7570
EI	-36.730	8.2280	0.6890
EA	-28.109	5.7230	0.8220

I	=	Infiltrabilidad (cm/hr).
E	=	Escurrecimiento superficial (cm).
ET	=	Erosión (kg/ha)
TE	=	Tasa de erosión (kg/ha/min)
EI	=	Erosión inicial (kg/ha/cm)
EA	=	Erosión acumulada (kg/ha/cm)

En la figura 4.27 se muestra la relación que guardó la erosionabilidad con la erosión del suelo (kg/ha). Los factores del suelo tales como contenido de materia orgánica, arenas gruesas, limos mas arenas finas y estructura, no fueron incluidos en el análisis de correlación, debido a que ya existe el modelo que relaciona estos factores, el cual fue utilizado para evaluar el factor erosionabilidad en este estudio (Apéndice A.4). Los valores del factor K obtenidos en cada unidad de muestreo se presentan en el Cuadro 4.22.

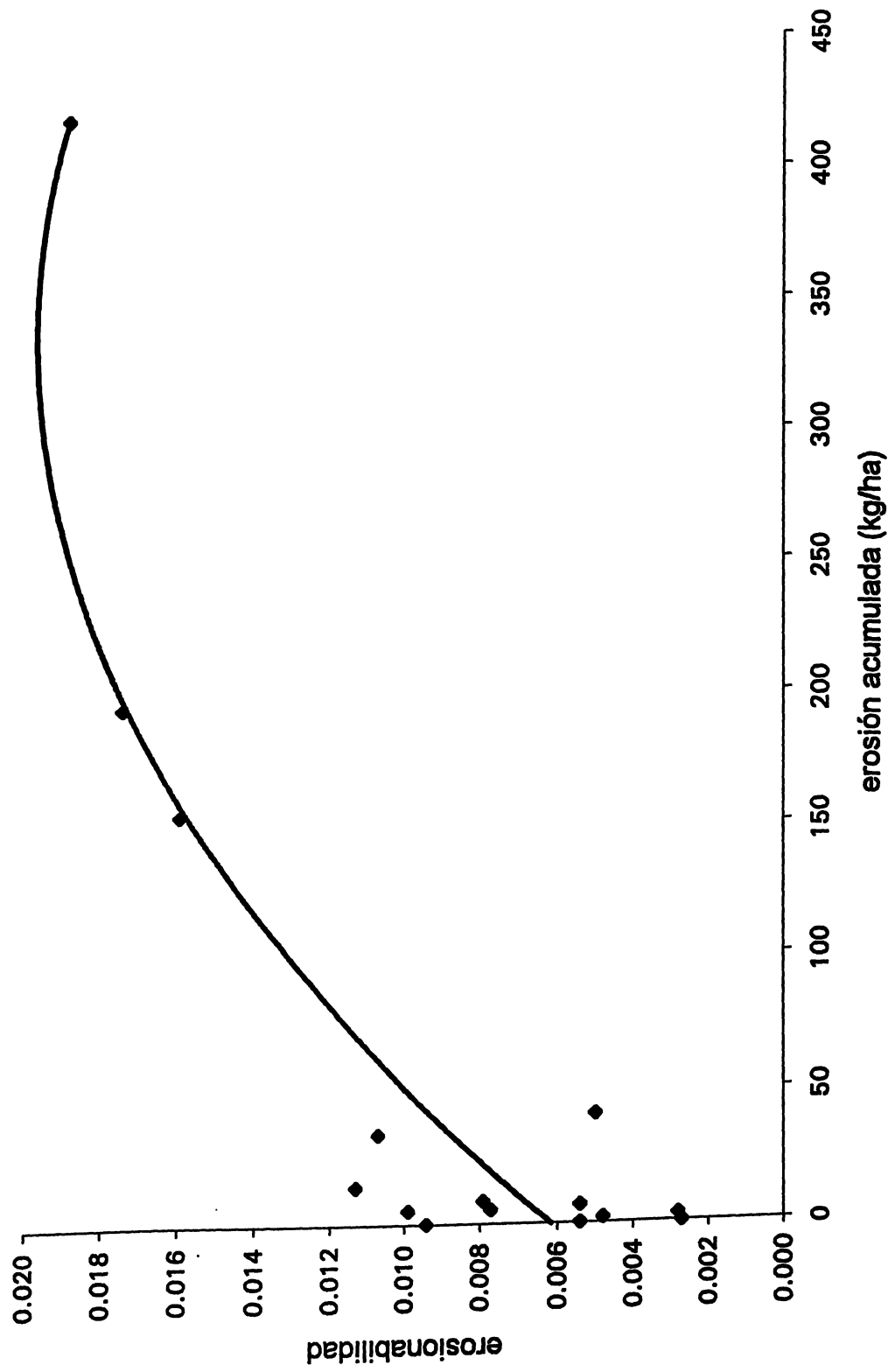


Figura 4.27. Relación entre erosionabilidad y la pérdida de suelo en la Reforestación Zapalinamé

Cuadro 4.22. Valores de erosionabilidad del suelo (100K)*

UNIDAD DE MUESTREO	SITIO I	SITIO II	SITIO III
1	0.99	0.28	1.74
2	0.27	0.48	0.50
3	0.79	0.77	0.54
4	0.54	1.07	1.59
5	0.01	0.94	0.48
6	0.10	1.13	1.88

K = ton ha hr / MJ mm ha.

Cuadro 4.23. Valor de F y medias observadas para el factor erosionabilidad del suelo (K)

Medias observadas en el sitio			Fc
I	II	III	
0.45	0.778	1.12	2.7819NS

Los resultados del análisis de varianza (Apéndice B.14) indican diferencias entre tratamientos a un nivel de significancia de 0.093, sin embargo, estas diferencias no son significativas a un nivel de 0.05.

Estabilidad de Agregados

En relación a la estabilidad de agregados, los valores del índice de agregación (diámetro medio geométrico) obtenidos para cada sitio, se presentan en el siguiente Cuadro 4.24.

Los datos de estabilidad de agregados fueron sometidos a análisis de varianza (Apéndice B.15) y prueba de medias Tukey 0.05.

Cuadro 4.24. Índice de agregación del suelo (DMG) en la Reforestación Zapalinamé

MUESTRA	SITIO I	SITIO II	SITIO III
1	1.35	0.60	0.74
2	1.27	1.00	0.81
3	1.09	0.53	0.96
4	1.98	0.99	0.84
5	1.70	0.98	1.02
6	1.77	0.79	0.53

Los resultados del análisis muestran que existen diferencias significativas entre tratamientos mas allá del nivel 0.01 del error tipo I, y que el índice de agregación fue mayor en el sitio reforestado en 1961, que el reforestado en 1973 y el sitio sin reforestar (Cuadro 4.25).

Cuadro 4.25. Valor de Fc y medias observadas para el Índice de Agregación en la Reforestación Zapalinamé

Medias observadas en los sitios			Fc
I	II	III	
1.526a	0.815b	0.816b	15.913**

Valores con literal distinta, difieren estadísticamente (Tukey, 0.05)

Se realizó un análisis de correlación lineal simple entre el factor erosionabilidad y el índice de agregación donde la relación obtenida fue negativa ($r = -0.3922$); De las variables independientes consideradas, la que mas relacionó con el índice de agregación fue la biomasa de mantillo ($r = 0.704$).

DISCUSION

El grado de asociación entre pares de variables se obtuvo utilizando análisis de regresión lineal simple, con lo cual se identificaron los factores de suelo y vegetación que mas afectan los procesos de infiltración, escurrimiento y erosión; las relaciones mas altas fueron graficadas, sin embargo, cuando la no linealidad fue evidente, se graficó su tendencia; no se obtuvo un modelo específico para las relaciones no lineales, ya que resultaría aventurado predecir otro tipo de distribución, contando con sólo 18 observaciones de acuerdo a lo expuesto por Ostle (1965).

Infiltrabilidad y Escurrimiento Superficial

La caracterización de la infiltrabilidad en un modelo lineal se considera adecuada debido a los coeficientes de determinación altos (mayores de 0.95) obtenidos en cada unidad experimental. De las variables de suelo y vegetación consideradas, las que tuvieron mayor relación con la infiltrabilidad fueron la cubierta vegetal total, la cubierta del mantillo, la estabilidad de agregados y la profundidad del suelo; la relación mas alta se presentó con el factor erosionabilidad del suelo.

En el caso de la cobertura vegetal y del mantillo, éstos forman un horizonte superior compuesto de hojas, tallos y otros materiales no descompuestos; las características de este horizonte determinan inmediatamente la cantidad de agua que puede entrar en el perfil, de acuerdo a lo expuesto por Thurrow et al. (1986), que indican que el principal efecto de la cobertura vegetal sobre la infiltrabilidad y el escurrimiento se debe a la protección que brinda al suelo contra la energía de las gotas de lluvia, al evitar que pequeñas partículas del suelo sean desprendidas y puestas en movimiento, que posteriormente sellarían la superficie del terreno, reduciendo la infiltración.

Un factor importante aún cuando no fue evaluado, fue el efecto del microrelieve o rugosidad superficial; al inicio de las pruebas de simulación de lluvia se observó que las depresiones detuvieron parte del agua aplicada, dando mayor oportunidad a que ésta se infiltrara; este efecto fue señalado con anterioridad por Wilcox (1988) y Beltrán (1988).

En relación a los modelos obtenidos para infiltrabilidad y escurrimiento, se observa que las coberturas de mantillo, gramíneas, suelo desnudo y grava, explican el 78.7 por ciento de la variación observada en infiltrabilidad y el 77.8 de la variación que se presentó en la lámina de escurrimiento.

Existió una tendencia a que la infiltrabilidad fuera mayor en los sitios reforestados que en el sitio sin reforestar, lo cual puede ser explicado en función de una mayor porosidad debida a la estructuración del suelo y a las cavidades dejadas por las raíces que incrementan la permeabilidad. Sin embargo, en dos unidades de muestreo del sitio sin reforestar, la infiltrabilidad fue tan alta como la observada en las unidades de muestreo de los sitios reforestados que no exhibieron escurrimiento superficial o que si lo presentaron fue mínimo. Lo anterior se vió reflejado en el resultado del ANVA que no detectó diferencia significativa entre sitios para esta variable; se deduce, que aunque existe una tendencia a que la infiltrabilidad y el escurrimiento se vean afectados por la reforestación, la evidencia no fue suficiente para aceptar la hipótesis H1 ($p=0.05$), que plantea que los procesos infiltración-escurrimiento se ven afectados por la reforestación. Esto concuerda con lo expuesto por Kirkby y Morgan (1984) y Figueroa (1991), en el sentido de que las áreas de pastizal (que predominan en el sitio sin reforestar), pueden ser tan eficientes como los bosques en el control del escurrimiento superficial.

Un cambio en la infiltrabilidad puede ser esperado, mientras la plantación de árboles se encuentra madurando (Ursic y Dendy, 1965), lo cual concuerda con los resultados obtenidos en el sitio experimental por Dueñez (1988), al trabajar con anillos concéntricos en los tres

tratamientos bajo estudio. No obstante, en el presente estudio, la infiltrabilidad no guardó una relación positiva significativa con la edad de la plantación. Resultados similares fueron reportados por De Luna (1988) que indica que el sitio reforestado en 1973 exhibe menor infiltrabilidad, incluso que el sitio sin reforestar.

Erosión

Tasa de Erosión

Inicialmente, al caracterizar el comportamiento de la erosión a través del tiempo, se obtuvo la tasa de erosión; las variables que mas se relacionaron a ella son cobertura vegetal, infiltrabilidad, cobertura de mantillo, arenas gruesas y estabilidad de agregados con sentido negativo, así como erosionabilidad y suelo desnudo con signo positivo. En el modelo obtenido para esta variable se observa que el suelo desnudo, la densidad aparente del suelo y el contenido de arenas gruesas, explican el 72.8 por ciento de la variación que presentó la tasa de erosión relacionada al tiempo de duración de la simulación de lluvia.

Se encontraron diferencias entre tratamientos a un nivel de significancia de 0.058 que aún cuando no rebasan el nivel 0.05 previamente determinado, sugieren la posible aceptación de la hipótesis H2 en el sentido de que la reforestación reduce las pérdidas de suelo. En una unidad

de muestreo del sitio sin reforestar la tasa de erosión fué hasta 13 veces mas alta que la obtenida en los sitios reforestados; con este resultado y las relaciones obtenidas en el análisis de correlación se pone de manifiesto la importancia del porcentaje de cobertura vegetal en la superficie del suelo, de acuerdo a lo reportado por Figueroa (1975), que indica que el control satisfactorio de la erosión se logra cuando se tiene al menos el 70 porciento de cobertura superficial.

Erosión Total

La variable que tuvo mayor relación positiva con la erosión total fue la erosionabilidad, que incluye en sí a varias propiedades del suelo, tales como arenas gruesas, arenas finas más limos e infiltrabilidad. La cobertura vegetal total, la cobertura del mantillo y la estabilidad de agregados fueron las variables que más se relacionaron en sentido negativo. Esto concuerda con lo expuesto por Kirkby y Morgan (1984), que al referirse a la erosión indican que la mecánica que presenta el proceso erosivo de desprendimiento, arrastre y sedimentación de las partículas del suelo, depende en forma determinante de la resistencia que brinden las características del suelo y vegetación en cualquier etapa del proceso.

La alta relación de la cobertura con las pérdidas de suelo puede ser explicada por la protección que ésta brinda a la superficie, contra la energía cinética de las

gotas de lluvia y por la obstrucción al transporte superficial de sedimentos; este efecto puede observarse al comparar los resultados obtenidos en el sitio reforestado en 1973 y el sitio sin reforestar; en ambos, el escurrimiento superficial y la infiltrabilidad fueron similares; sin embargo las pérdidas de suelo fueron considerablemente menores en el sitio arbolado; aún cuando la infiltrabilidad se relacionó con la pérdida de suelo, la cobertura siempre presentó correlaciones más altas.

De las características de la cobertura vegetal, la cubierta de mantillo presentó una relación negativa más alta que las demás, sólo superada por la cobertura total y se considera que fue un factor importante para evitar el desprendimiento y transporte de suelo; resultados similares fueron reportados por Heede (1987).

En relación a las demás evaluaciones realizadas a la vegetación, tales como fitomasa total, de gramíneas o de mantillo, la erosión total guardó mejor relación con los factores de cobertura más que con los de fitomasa, lo cual corresponde a lo reportado por Wilcox et al. (1988) y Beltrán (1988).

De acuerdo al modelo de regresión lineal múltiple, la presencia de suelo desnudo y el contenido de arenas gruesas, explican el 82.18 por ciento de la variación que se presentó en la erosión total. En ese sentido, las relaciones que guardaron la cobertura vegetal y el suelo

desnudo con la erosión total fueron de magnitud similar, pero con sentido contrario.

La erosión total registrada en los sitios reforestados fue estadísticamente menor a la obtenida en el sitio sin reforestar con una significancia mas allá del nivel 0.05, por lo cual se acepta la hipótesis H2 que establece que la reforestación reduce significativamente las pérdidas de suelo.

Se considera que la fuerza abrasiva del flujo superficial no fue un factor determinante en la erosión total debido a lo pequeño de las parcelas que minimizan el efecto L (longitud) y que la relación alta que guardó el escurrimiento superficial con la erosión total ($r=0.667$) estuvo asociada a la capacidad de transporte que exhibe el flujo superficial.

Erosión Inicial

El análisis de la erosión inicial en los sitios sujetos a estudio se consideró importante, ya que al inicio de la precipitación, las pérdidas de suelo son mas altas, por la cantidad de suelo seco y suelto que puede ponerse en suspensión y erosionarse.

La erosión inicial se evaluó sólo en los sitios que presentaron escurrimiento; las variables que se relacionaron a élla con signo negativo, fueron el contenido de arenas gruesas, la velocidad de infiltración,

la cobertura aérea total, la cubierta de mantillo y la estabilidad de agregados, en ese orden; en forma positiva, la relación fue alta con la presencia de limos más arenas muy finas y el porcentaje de suelo desnudo.

Su relación con las arenas gruesas se puede explicar por la resistencia que estas partículas presentan al movimiento, debido a su peso. La relación positiva con limos más arenas finas, va de acuerdo con lo expresado por Wischmeier y Mannering (1969), en el sentido de que los suelos con altos contenidos de estas partículas son los más susceptibles a la erosión; así mismo, cuando disminuyó la fracción de limos y se incrementó el contenido de arena, la erosión inicial también se redujo.

En el modelo obtenido con la regresión lineal múltiple, se observa que el contenido de arenas gruesas explica el 55.9 por ciento de la variación que presentó la erosión inicial en los sitios evaluados.

La erosión inicial en relación al escurrimiento, que se observó en los sitios reforestados fue significativamente menor que la del sitio sin reforestar a un nivel de significancia de 0.054, lo cual refuerza la aceptación de la hipótesis H2 que plantea que la reforestación reduce las pérdidas de suelo.

La erosión inicial pudiera parecer alta en el sitio reforestado en 1961 ($x = 17.15 \text{ kg/ha/cm}$) comparada

con la obtenida en el sitio reforestado en 1973 ($x = 8.108$ kh/ha/cm), sin embargo, no se debe pasar por alto que el escurrimiento medio fue menor en el primero ($x = 0.558$ cm) comparado con el generado en la reforestación de 19 años ($x = 1.658$ cm).

Erosión Acumulada en Relación al Escurrimiento

Las variables que tuvieron mayor correlación negativa con la erosión acumulada fueron: arenas gruesas, infiltrabilidad, cobertura del mantillo, fitomasa aérea y estabilidad de agregados. Las variables que tuvieron una relación positiva significativa fueron la presencia de limo más arenas finas y el suelo desnudo.

En los sitios reforestados, la erosión acumulada en relación al escurrimiento tomó valores desde 0.25 hasta 13 kg/ha/cm; en el sitio sin forestar los valores obtenidos variaron de 3.9 a 117.43 kg/ha por centímetro de lámina de escurrimiento; ésto permite apreciar la magnitud de las pérdidas de suelo que se pueden tener en función del escurrimiento superficial que se presenta en la zona semiárida con lluvias de alta intensidad, en relación a los diferentes porcentajes de cobertura del suelo.

De acuerdo al modelo de regresión lineal múltiple obtenido para la erosión acumulada, la presencia de suelo desnudo y el contenido de arenas gruesas, explican el 80.55 por ciento de la variación observada en los sitios

bajo estudio.

La erosión acumulada en relación a la lámina de escurrimiento, manifestó diferencias altamente significativas entre tratamientos; el sitio sin reforestar presentó valores mas altos que los sitios reforestados y éstos últimos no fueron estadísticamente diferentes entre sí; se acepta la hipótesis H2 que establece que la reforestación reduce significativamente las pérdidas de suelo.

Las variables que tuvieron poca relación con la pérdida de suelo estimada a través de la erosión total, tasa de erosión, así como erosión inicial y acumulada en relación a la lámina de escurrimiento fueron: contenido de arcilla, pendiente del terreno y humedad inicial; ésto se explica por la poca o nula diferencia estadística que se vió para estas variables en los sitios bajo estudio, lo cual satisface uno de los objetivos al ubicar las unidades de muestreo, cuando se buscó que los sitios estuvieran en la misma posición fisiográfica y con características de suelo y pendientes similares a simple vista, que nos permitieran evaluar el efecto de la cobertura vegetal.

En relación a la pendiente del terreno (factor LS), la baja relación puede deberse a que la longitud de la pendiente en el sentido del escurrimiento (1m) dentro de las unidades de muestreo donde se aplicó la lluvia, fue

muy pequeña y no permitió que el efecto L se manifestara; el grado de pendiente (S) tampoco manifestó relación significativa por la poca variación que se reportó para esta variable entre tratamientos.

Erosionabilidad

La erosionabilidad guardó las relaciones mas altas con las variables dependientes evaluadas en el estudio (cuadro 4.18), si se compara con la relación que éstas presentaron con cualquiera de las variables independientes analizadas en forma individual; sólo fue superada por la relación que guardó el contenido de arenas gruesas con la producción total e inicial de sedimentos. No se incluyó en la matriz de regresión lineal, debido a que cada uno de los factores utilizado para estimar erosionabilidad se analizó en forma individual.

La erosionabilidad no manifestó diferencia significativa entre tratamientos a un nivel 0.05, posiblemente debido a que de los cinco parámetros utilizados para evaluarla (limos mas arenas finas, arenas gruesas, materia orgánica, estructura y permeabilidad), sólo el contenido de arenas gruesas fue diferente entre sitios estudiados.

Estabilidad de Agregados

La estabilidad de agregados se consideró un buen indicador para estimar los cambios originados en la

estructura del suelo por efecto de la reforestación; los resultados del ANVA para esta variable, indican diferencias estadísticas altamente significativas entre tratamientos para el índice de agregación; por lo anterior se acepta la hipótesis H4 que establece que la reforestación modifica y mejora la estabilidad de agregados.

Contrariamente a lo reportado en la literatura, la estabilidad de agregados guardó una relación baja con el contenido de materia orgánica del suelo ($r=0.206$), posiblemente debido a que los suelos del sitio sin reforestar presentaron niveles altos en el contenido de materia orgánica, similares a los encontrados en los sitios reforestados. Sin embargo el índice de agregación guardó una relación altamente significativa con la biomasa de mantillo ($r=0.704$), lo cual puede atribuirse a dos condiciones: la primera es que se aporta mayor cantidad de residuos en los sitios reforestados y dichos residuos son fuente de energía para la formación de compuestos de humus altamente estables (Baver, 1972); la segunda condición se refiere a la cantidad de mantillo en la superficie; a medida que se incrementa se brinda mayor protección a los agregados de la superficie del suelo, contra la acción destructora de las gotas de lluvia.

La estabilidad de agregados presentó relaciones altas y consistentes con con la producción de sedimentos,

concordando con lo reportado por Bruce-Okine y Lal (1975). El efecto de este factor, puede explicarse por la resistencia que oponen los agregados estables del suelo superficial al desprendimiento y dispersión causado por el impacto directo de las gotas de lluvia; o bien, porque los agregados en el perfil del suelo influyen en el tamaño de poros y éstos a su vez tienen influencia en la rapidez de absorción de agua.

En general los índices de agregación obtenidos en todos los sitios evaluados se consideran altos. La relación de la estabilidad de agregados con la velocidad de infiltración y la lámina de escurrimiento fue significativa, con valores de r mayores de 0.5; también presentó relación significativa con la producción de total sedimentos.

CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en la Reforestación Zapalinamé en el presente estudio, se concluye lo siguiente:

1. La infiltrabilidad, la infiltración acumulada (%) y el escurrimiento no se ven afectados por la reforestación. Las variables de suelo y vegetación que tienen mayor influencia en los procesos infiltración-escurrimiento son la cubierta vegetal total, la cubierta del mantillo, la estabilidad de agregados y la profundidad del suelo.
2. La erosión del suelo se ve afectada por la reforestación; fue mayor en el sitio sin reforestar que en los sitios reforestados; se reconoce que la reforestación reduce la pérdida de suelo. Las variables que tuvieron mayor relación con la erosión fueron: la erosionabilidad del suelo, la cubierta vegetal total, la infiltrabilidad, la cubierta del mantillo y la estabilidad de agregados.
3. El factor erosionabilidad no se ve afectado significativamente por la reforestación; se relaciona

estrechamente con la infiltrabilidad, el escurrimiento y la pérdida de suelo.

4. La vegetación establecida por reforestación incrementa la estabilidad de la estructura del suelo; el índice de agregación del sitio reforestado en 1961 fue mayor a los observados en el sitio reforestado en 1973 y el sitio sin reforestar.
5. De acuerdo a las relaciones observadas entre variables, se reconoce la importancia de la vegetación en la reducción de la erosión hídrica en tres sentidos: mantiene en la superficie del suelo un estado poroso que promueve la penetración de agua en el suelo y reduce el escurrimiento superficial; incrementa la estabilidad de agregados del suelo y reduce la erosionabilidad; y, protege al suelo superficial del impacto de las gotas de lluvia.

RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue determinar el efecto de la reforestación en el control de la erosión hídrica. El trabajo se condujo en verano de 1992 en la Sierra Zapalinamé al Sur del Mpio. de Saltillo, Coah., en una reforestación de Pinus halepensis. Los sitios bajo estudio fueron tres: reforestación de 31 años; reforestación de 19 años y un sitio sin reforestar que presentaba vegetación de pastizal.

Se utilizó un simulador de lluvia, similar al descrito por Wilcox et al (1986), para aplicar durante treinta minutos una lluvia de 98.5 mm/hr de intensidad, sobre parcelas circulares de un metro de diámetro. La infiltrabilidad se estimó como la diferencia entre la lluvia aplicada y el escurrimiento en relación al tiempo. La pérdida de suelo se evaluó como erosión total, erosión inicial y erosión acumulada en relación al escurrimiento; también se analizó la tasa de erosión. La erosionabilidad fué calculada por el procedimiento de Wischmeier y Smith (1978) y la estabilidad de la estructura se estimó como un índice de agregación. Se midieron atributos de la vegetación y condiciones del suelo para conocer su relación con las variables en estudio.

Los resultados indican que la infiltrabilidad y el escurrimiento superficial no difieren estadísticamente entre sitios reforestados y no reforestados. Los valores que tomó la infiltrabilidad fueron de 8.89 y 7.03 centímetros por hora para las reforestaciones de 31 y 19 años respectivamente y de 6.82 para el sitio sin reforestar. La pérdida de suelo presentó diferencias significativas entre tratamientos para la erosión total y erosión acumulada por lámina de escurrimiento; las pérdidas de suelo registradas en los sitios reforestados durante los treinta minutos de lluvia fueron de 5.34 y 9.95 kilogramos por hectárea para la reforestación de 31 y 19 años respectivamente, comparadas con 162.47 kg/ha que se erosionaron en el sitio sin reforestar. Los sitios reforestados son más eficientes en el control de la erosión hídrica que el sitio sin reforestar.

La erosionabilidad del suelo no mostró diferencia estadística entre sitios, sin embargo mostró una relación alta con la infiltrabilidad, escurrimiento superficial y pérdida de suelo. La estabilidad de la estructura tuvo mejor índice de agregación en el sitio reforestado en 1961 y mostró diferencias significativas con los dos sitios restantes.

De las variables de suelo y vegetación, la erosionabilidad, la cubierta vegetal total, la cubierta del mantillo, la estabilidad de la estructura y la

profundidad del suelo, fueron los factores más relacionados con la infiltrabilidad. La erosión hídrica laminar se relacionó con la erosionabilidad del suelo, cobertura vegetal total, textura, cobertura del mantillo, velocidad de infiltración y estabilidad de la estructura.

LITERATURA CITADA

- Anderson, A. R. and D. G. Pyatt. 1986. Interception of Precipitation by Pole-stage Sitka Spruce and Lodgepole Pine and Mature Sitka Spruce al Kielder Forest Northumberland. *Forestry* 59 (1): 29-38
- Anderson, E. W. and L. E. Brooks. 1975. Reducing Erosion Hazard on a Burned Forest in Oregon by Seeding. *J. Range Manage.* 28 (5) 394 -398. USA
- Baver, L. D., W. H. Garner y W. R. Gardner. 1972. Física de Suelos. 4a. Ed. UTEHA. p 148-204. México.
- Beasley, R. P. 1972. Erosion and Sediment Pollution Control. Iowa State University Press. Ames Iowa. USA. 320 p.
- Beltrán L., S. 1988. Infiltración y Producción de Sedimentos en Tres Tipos de Vegetación del Rancho Los Angeles. Tesis Maestría. UAAAN. Saltillo, Coah. Méx. 94 p.
- Blackburn, W. H., R. W. Knight, J. C. Wood and H. A. Pearson. 1990. Stormflow and Sediment Loss from Intensively Managed Forest Watersheds in East Texas. *Water Resources Bulletin* 26 (3) 465-477.
- Castin, A. B. and C. I. Dooge. 1973. Balancing the Effect of Mans Actions on the Hydrological Cicle. *Irrigation and Drainage Paper.* ISSUE No. 7; FAO p 33-40; Special.
- Coote, D. R., C. A. Malcolm-McGovern, G. J. Wall, W. T. Dickinson and R. P. Rudra. 1988. Seasonal Variation of Erodibility Indices Based on Shear Strength and Aggregate Stability in Some Ontario Soils. *Can. J. Soil Sci.* 68: 405-416.
- Cortés T., H. G. 1991. Caracterización de la Erosividad de la Lluvia en México Utilizando Métodos Multivariados. Tesis Maestría. Centro de Edafología. C. P. Chapingo, Méx. 168 p.
- Dissmeyer G. E., and G. R. Foster. 1981. Estimating the Cover Management Factor (C) in the Universal Soil Loss Equation for Forest Conditions. *J. Soil Water Conserv.* 36: 235-240.

- Dixon, R. M. 1971. Infiltration Role of Large Soil Pores: a Channel System Concept. In: Biological Effects in the Hydrological Cycle; Purdue Univ., West. Lafayette, Indiana; p 136-147. USA.
- Douglas J. T. and M. J. Goss. 1982. Stability and Organic Matter Content of Surface Soil Aggregates under Different Methods of Cultivation an in Grassland. Soil & Tillage Research 2: 155-175
- Dueñez A., J. 1988. Comportamiento de la Infiltración en una Reforestación con Pinus halepensis Mill. al Sureste de Coahuila. Tesis Lic. UAAAN. Saltillo, Coah. México. 58 p.
- Dueñez A., J. 1993. Impacto del Uso Múltiple sobre la Infiltrabilidad y la Erosión en la Cuenca "Paso de Piedra" Durango. Tesis Maestría. UAAAN. p 31-35. Saltillo, Coah. México.
- Figueroa S., B. 1975. Pérdida de Suelo y Nutrientos y su Relación con el Uso del Suelo en la Cuenca del Río Texcoco. Tesis. M.C. Colegio de Postgraduados de Chapingo. Chapingo, Méx.
- Figueroa S., B. (Comp.). 1991. Memorias del Curso de Conservación del Suelo y Agua. SARH-PROCATI-CP. Oct. 1991. San Luis Potosí, S.L.P. México. 530 p.
- Foster, G. R. and L. D. Meyer. 1977. Soil Erosion and Sedimentation by water overview. In: Soil Erosion and Sedimentation Proceeding of the National Symposium on Soil Erosion and Sedimentation by Water. Published by ASAE p. 91 - 106.
- Foster, G. R., F. P. Eppert and L. D. Meyer. 1979. A Programmable Rainfall Simulator for Field Plots. Proc. Rainfall Simulator Wordkshop. Tucson Ariz. p. 45-59. USA
- Foster, G. R., D. K. McCool, K. G. Renard and W. C. Moldenhauer. 1981. Conversion of the Universal Soil Loss Equation (USLE) to SI Metric Units. J. Soil and Water Conserv. 36 (6) 335-359
- Gutiérrez C., J. y M. A. Salazar. 1986. Impacto de la Reforestación en la Sierra Zapalinamé sobre las Tasas de Infiltración. Agraria. Rev. Cient. UAAAN 2 (2) 286-302.
- Heede, B. H. 1984. Overland Flow and Sediment Delivery an Experiment with Small Subdrainage in South Western Ponderosa Pine Forestry. Co. USA. J. Hydrology. 72: 261-273.

- Hewlett J. D. and R. Doss. 1984. Forest Floods and Erosion; A Watershed Experiment in the Southeastern Piedmont. *Forest Sci.* 30 (2) 424-434
- Hudson, N. W. 1977. Soil Conservation. Cornell University Press. Ithaca, New York. USA. 319 p.
- Kirkby, M. J. 1984. El Problema. In: Kirkby, M. J. y R.P.C. Morgan, Ed. *Erosión de Suelos*. Ed. Limusa; México. p 15-33 USA
- Kirkby, M. J. y R. P. C. Morgan. 1984. *Erosión de Suelos*. Ed. Limusa. México 375 p.
- Laflen, J. M. 1981. Use of Rainfall Simulators to Determine Parameters for Erosion Prediction; In: *Proc of the Workshop on Estimating Erosion and Sediment Yield on Rangelands*. Tech. Report. ARM-W-26; Tucson, Ariz. p 106-114.
- Lindsay, J. I., and F. A. Gumbs. 1982. Erodibility Indices Compared to Measured Values of Selected Trinidad Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 393-396
- Luna R., M. de. 1989. Influencia de las Edades de la Reforestación Zapalinamé sobre la Infiltración y la Producción de Sedimentos. Tesis Lic. UAAAN. Saltillo, Coah. México. 64 p.
- Mathus M., G. y L. Castañeda C. 1978. Zapalinamé: Un Oásis en el Semidesierto de Coahuila. *Plantaciones Forestales*. Pub. Esp. No. 13. SARH-INIF México.
- Martínez M., M.R. 1983. Perspectivas Técnicas Sobre la Conservación y Productividad de los Suelos en México. *Rev. Terra*. SMCS México. p 24-30
- Meewing, R. O., and P. E. Packer. 1976. Erosion and Runnof on Forest and Rangeland; In: *Proc. Watershed Management on Range and Forest Lands*. Utah State University. Water Res. Lab. Logan. Utah USA. 15-22. 222 p
- Megahan W. F. 1972. Logging, Erosion, Sedimentation: are They the Dirty Words? *J. For.* 70: 403-407
- Mendoza H., J. M. 1983. Diagnóstico Climático para la Zona de Influencia Inmediata de la UAAAN. Depto. de Agrometeorología UAAAN; Saltillo, Coah. México.
- Morgan R., P. C. 1984. Implicaciones. In: Kirkby, M. J. y R. P. C. Morgan (Ed). *Erosión del Suelo*. Ed. Limusa. México. p. 307-362.

- Narro F., E. 1987. Física de Suelos con Enfoque Agrícola. Depto. de Suelos. UAAAN. Saltillo, Coah. México.
- Neff, E. L. 1979. Why Rainfall Simulation?. In: USDA (ed) Proceedings of the Rainfall Simulators Workshop. Science Reviews and Manuals. ARM-W-10 USA. 85 p.
- Oviedo R., J. L. 1980. Inventario de las Alternativas de Transformación de Especies Forestales de la Sierra Zapalinamé. Tesis Lic. UAAAN. Saltillo, Coah. Méx. 88 p
- Panetsos P. K. 1981. Monograph of Pinus halepensis Mill and P. brutia Ten. Ann. Forest 9/2 pp 39-77
- Patric, J. M., J. O. Evans and J. D. Helvey. 1984. Sumary of Sediment Yield data from Forested Land in the United States. J. For. 82: 101-104.
- Pritchett, L. W. 1986. Suelos Forestales: Propiedades, Conservación y Mejoramiento. Ed. Limusa. México. 364 p.
- Ríos B., J. D. 1987. Efecto de la Cobertura Vegetal en el Proceso Erosivo. Tesis Maestría. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados, Chapingo. México. 226 p.
- Sánchez B., C. 1984. Effects of Livestock Grazing and Exclusion on Infiltration Rates and Sediment Yields for Different Range Site on El Plateado Watershed Zacatecas, México. PhD Dissertation. New Mexico State Univ. Las Cruces, New Mexico. USA. 156 P.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1986. Inventario Nacional de Areas Erosionadas en México. SARH. México, D. F.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1977. Colegio de Postgraduados. Manual de Conservación del Suelo y Agua. Colegio de Postgraduados. CHapingo. México 584 p.
- Singh T. 1970. Infiltration and Soil Stability of a Summer Range. J. Range Manage 22 (2): 123-127
- Suárez, F. C. 1979. Conservación de Suelos. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. San José Costa Rica. 315 p.
- Tromble, J. M., K. G. Renard y A. P. Thatcher. 1979. Infiltración del Agua en Tres Complejos de Suelo-Vegetación de Pastizales. Selecciones del J. Range Manage 2(4): 210-213. México.

- Ursic, S. J. and F. E. Dendy. 1965. Sediment Yields from Small Watersheds under Various Land Uses and Forest Covers. In: Proc. Fed. Inter-Agency Sedimentation Conf. USDA. Misc. Publ. p 47-52
- Wilcox, B. P., M. K. Wood, J. T. Tromble y T. J. Ward. 1986. A Hand-Portable Single Nozzle Rainfall Simulator Designed for Use on Steep Slopes. J. Range Manage. 39 (4): 375-377.
- Wilcox, B. P., M. K. Wood and J. M. Tromble. 1988. Factors Influencing Infiltrability of Semiarid Mountain Slopes. J. Range Manage. 41 (3):197-114
- Williams G., G. F. Gifford and G. B. Coltharp. 1969. Infiltrometer Studies on Treated VS Untreated Pinyon-juniper sites in Central Utah. J. Range Manage. 22: 110-114
- Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1965. Predicting Rainfall Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains. USDA Agr. Handbook 282.
- Wischmeier, W. H. and J. V. Mannering. 1969. Relation of Properties to its Erodibility. Proc. Am. Soil Soc. 33: 131-137
- Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses-a Guide to Conservation Planning- USDA; Agriculture Handbook 537. Sci and Educ. Admin. USDA Washington, D.C. 59 p.
- Wischmeier, W. H., C. B. Johnson, and B. V. Cross. 1971. A soil Erodibility Nomograph for Farmland and Construction Sites. J. Soil Water Conserv. 26:189-193
- Wisler, C. D. and E. E. Brater. 1959. Hydrology. 2a. Ed. John Wiley & Sons Inc. New York. USA. 408 p.
- Young, R. A., and C. K. Mutchler. 1977. Erodibility of Some Minnesota Soil. J. Soil Water Conserv. 32: 180-182
- Zárate L., A. 1988. Determinación de las Tasas de Infiltración, Esgurrimiento y Producción de Sedimentos en Tres Tipos de Suelo del Rancho Los Angeles. Tesis Maestría. UAAAN, Saltillo, Coah. México. 106 p.
- Zingg, A. W. 1940. Degree and Length of Landslope as it Effects Soil Loss in Runnoff. Agric. Eng. 21:59-64.

APENDICE A

Cuadro A.1. Estimación de la Erosividad de la lluvia

PERIODO (minutos)	LLUVIA APLICADA		(ENERGIA (MJ/ha)	
	CANTIDAD (mm)	INTENSIDAD mm/hr	POR mm	POR INCREMENTO
5	8.09	97.08	0.2925	2.366
10	8.23	98.78	0.2931	2.412
15	8.33	100.00	0.2936	2.446
20	8.21	98.47	0.2930	2.406
25	8.36	100.35	0.2937	2.455
30	8.06	96.72	0.2923	2.356

ENERGIA CINETICA PARA EL PERIODO = 14.441

DURACION DE LA LLUVIA: 30 minutos
 CANTIDAD APLICADA: 49.28 milímetros
 INTENSIDAD: 98.56 mm/hr
 ENERGIA POR MILIMETRO DE LLUVIA: 0.29305 MJ/ha
 ENERGIA POR PERIODO: 14.4415 MJ/ha
 AJUSTE POR TIPO DE SIMULADOR 0.36
 ENERGIA POR PERIODO AJUSTADA: 5.1989 MJ/ha

EI30 = (5.1989 MJ/ha) (98.56 mm/hr)
 EI30 = 512.40 MJmm/hahr

Cuadro A.2. Ejemplo de forma de registro y cálculo para obtener infiltrabilidad

SITIO	INTERV.DE TIEMPO	LAMINA DE ESC. (cm) (1)	LAMINA INF. (cm) (2)	INFILTR. ACUM. (cm) (3)	VEL. DE INF. (cm.hr) (4)
T3R1	5	0.0116	0.8098	0.8098	9.717
	10	0.3603	0.4611	1.2709	5.533
	15	0.4584	0.3630	1.6339	4.356
	20	0.4864	0.3350	1.9689	4.020
	25	0.4813	0.3401	2.3091	4.081
	30	0.5029	0.3185	2.6275	3.822

T3RI: Corresponde a la repetición 1 del tratamiento 3 (sitio sin reforestar)

- (1): Se obtuvo con los registros de campo al transformar el volumen (litros) escurrido en cada período de cinco minutos a lámina de ecurrimiento.
- (2): Resulta de la diferencia entre la lámina aplicada en cada período de cinco minutos (0.8214 cm) y la lámina escurrida en ese período.
- (3): Representa la lámina total infiltrada desde el inicio de la prueba a cualquier período de tiempo.
- (4): Es el cociente de la lámina infiltrada entre el período de tiempo y transformando a cm/hr.

Cuadro A.3. Ejemplo del cálculo de la estabilidad de agregados utilizando el diámetro medio geométrico (DMG) como índice de agregación

SITIO	DIAMETRO (D) (mm)	PESO (w) DE LA FRACCION (gr)	PRODUCTO (Log D)w	SUMA DE PRODUC- TOS	PESO DE LA MUES- TRA (gr)
T1R1	12.70	37.65	95.65		
	6.35	7.33	13.55		
	4.76	2.91	4.54		
	2.00	22.74	15.76		
	1.00	5.16	0.00		
	0.50	4.30	-2.98		
	0.25	2.58	-3.58	122.98	90.72
				DMG =	1.35

T1R1: Corresponde a la repetición 1 del tratamiento 1 (sitio reforestado con árboles maduros).

D: Diámetro medio de una fracción de agregados; en el caso del tamizado en húmedo, corresponde al diámetro de la malla del tamiz.

w: Peso (suelo secado al aire) de la fracción de agregados de un tamaño de diámetro D, después del cribado en húmedo.

DMG: Cociente que resulta de dividir la suma de los productos correspondientes a todas las fracciones entre el peso total de la muestra.

Cuadro A.4. Valores de los parámetros para determinar erosionabilidad del suelo utilizando la ecuación de Wischmeier y Smith (1978)

SITIO	M.O. (%) (a)	(b)	VEL. INF. (cm/hr)	(c)	LIMO + ARENA FINA	ARCI LLA	M	⁻³ Kx10
T1R1	5.79	2	7.66	(2)	28.0	8.4	2565	9.9
T1R2	5.72	2	9.84	(2)	16.0	20.4	1774	2.7
T1R3	5.79	2	8.75	(2)	22.0	16.4	1839	7.9
T1R4	6.26	2	7.39	(2)	24.0	20.4	1910	5.4
T1R5	5.86	2	9.86	(1)	18.0	20.4	1433	0.1
T1R6	5.05	2	9.86	(1)	18.0	20.4	1433	1.0
T2R1	5.79	2	7.03	(2)	16.0	18.4	1306	2.8
T2R2	5.65	2	9.67	(2)	20.0	18.4	1632	4.8
T2R3	5.32	2	6.68	(2)	24.0	14.4	2054	7.7
T2R4	6.12	3	4.49	(3)	18.0	20.4	1433	10.7
T2R5	5.58	2	8.93	(2)	28.0	14.4	2397	9.4
T2R6	5.32	2	5.39	(3)	24.0	12.4	2102	11.3
T3R1	5.79	3	5.73	(3)	30.4	16.0	2554	17.4
T3R2	8.21	2	7.18	(2)	30.4	14.0	2614	5.0
T3R3	6.12	2	9.79	(2)	24.4	24.0	1854	5.4
T3R4	5.20	3	5.13	(3)	26.4	20.0	2112	15.9
T3R5	6.59	2	9.86	(1)	34.4	26.0	2546	4.8
T3R6	6.59	3	3.20	(3)	38.4	18.0	3149	18.8

(a): Contenido de materia orgánica (%)

(b): Código de estructura del suelo (Cuadro 2.1)

(c): Código de permeabilidad del perfil (Cuadro 2.2)

M : (% de limos + arenas muy finas) (100 - % de arcilla)

K : $(2.1 \times 10^{-4}) (M^{1.14}) (12 - a) + 3.25 (b-2) + 2.5 (c-3)$

A P E N D I C E B

- MATRIZ DE CORRELACION LINEAL SIMPLE ENTRE LAS PRINCIPALES VARIABLES ESTUDIADAS
- ANALISIS DE VARIANZA PARA LOS MODELOS AJUSTADOS
- ANALISIS DE VARIANZA PARA LAS VARIABLES HIDROLOGICAS EN ESTUDIO
- PRUEBAS DE MEDIAS (TUKEY, 0.05).

Cuadro B.1. Matriz de correlación simple entre las principales variables estudiadas

VARIABLE	I	%I	E	TE	EI	ET	EA
I	1.00	1.00	-0.99	-0.69	-0.64	-0.69	-0.65
% I	1.00	1.00	-0.99	-0.69	-0.64	-0.69	-0.65
E	-0.99	-0.99	1.00	0.66	0.62	0.67	0.63
TE	-0.69	-0.69	0.66	1.00	0.91	0.99	0.95
EI	-0.64	-0.64	0.61	0.91	1.00	0.88	0.84
ET	-0.69	-0.69	0.66	0.99	0.88	1.00	0.97
EA	-0.65	-0.65	0.62	0.95	0.84	0.97	1.00
1	-0.14	-0.14	0.14	0.00	-0.15	0.00	0.07
2	-0.13	-0.13	0.11	0.30	0.44	0.27	0.29
3	0.53	0.53	-0.54	-0.37	-0.3	-0.34	-0.33
4	0.14	0.14	-0.14	-0.55	-0.74	-0.81	-0.80
5	-0.37	-0.37	0.35	0.62	0.65	0.72	0.72
6	0.31	0.31	-0.34	-0.02	0.10	0.08	0.07
7	0.52	0.52	-0.54	-0.41	-0.35	-0.40	-0.40
8	0.02	0.02	-0.03	-0.01	-0.07	0.08	0.23
9	-0.01	-0.01	0.00	0.06	0.01	0.04	-0.09
10	0.29	0.29	-0.29	-0.21	-0.54	-0.45	-0.53
11	0.49	0.49	-0.50	-0.35	-0.34	-0.34	-0.36
12	0.47	0.47	-0.48	-0.33	-0.44	-0.41	-0.45
13	0.23	0.23	-0.23	-0.20	-0.14	-0.19	-0.18
14	0.63	0.63	-0.61	-0.60	-0.50	-0.64	-0.64
15	0.75	0.75	-0.74	-0.70	-0.56	-0.72	-0.72
16	-0.77	-0.77	0.76	0.70	0.46	0.72	0.72
17	-0.36	-0.36	0.37	0.29	0.41	0.22	0.21

I. Infiltrabilidad
 % I. Porcentaje de infiltración

E. Lámina de escurrimiento

TE. Tasa de erosión

1. Pendiente

2. Materia orgánica

3. Profundidad del suelo

4. Contenido de arenas gruesas

5. Arenas gruesas mas limo

6. Contenido de arcilla

7. Estabilidad de agregados (DMG)

8. Densidad aparente del suelo

9. Humedad inicial

EI. Erosión inicial

ET. Erosión total

EA. Erosión acumulada en relación al escurrimiento

10. Biomasa en pie

11. Biomasa de mantillo

12. Biomasa aérea total

13. Cobertura de gramíneas

14. Cobertura de mantillo

15. Cobertura total

16. Suelo desnudo

17. Grava superficial

Cuadro B.2. Análisis de varianza del modelo para infiltrabilidad

F.V.	gl	SC	CM	Fc.
Modelo	4	0.0169326	0.0042331	12.0452 **
Error	13	0.0045687	0.00035144	
Total	17	0.0215013		

$$R^2 = 0.787515$$

$$R^2 \text{ (Ajustada por gl)} = 0.722134$$

$$\text{Error estándar del modelo} = 0.0187467$$

Cuadro B.3. Análisis de varianza del modelo para la lámina de escurrimiento.

F.V.	gl	SC	CM	Fc.
Modelo	4	18.1362	4.53406	11.3889 **
Error	13	5.1755	0.39811	
Total	17	23.3117		

$$R^2 = 0.777989$$

$$R^2 \text{ (Ajustada por gl)} = 0.709678$$

$$\text{Error estándar del modelo} = 0.630961$$

Cuadro B.4. Análisis de varianza del modelo para la tasa de erosión

F.V.	gl	SC	CM	Fc.
Modelo	3	50.982	50.3274	12.5313**
Error	14	56.226	4.0161	
Total	17	207.208		

$$R^2 = 0.728651$$

$$R^2 \text{ (Corregida por gl)} = 0.670504$$

$$\text{Error estándar del modelo} = 2.00403$$

Cuadro B.5. Análisis de varianza del modelo de erosión total en los sitios donde hubo escurrimiento.

F.V.	gl	SC	CM	Fc.
Modelo	2	154781.9	77390.7	27.6798 **
Error	12	33551.1	2795.9	
Total	14	188333.0		

$$R^2 = 0.821852$$

$$R^2 \text{ (Ajustada por gl)} = 0.792160$$

$$\text{Error estándar del modelo} = 52.8765$$

Cuadro B.6. Análisis de varianza del modelo para la erosión inicial

F.V.	gl	SC	CM	Fc.
Modelo	1	28967.8	28967.8	16.4894 **
Error	13	22837.8	1756.8	
Total	14	51805.5		

$$R^2 = 0.559164$$

$$R^2 \text{ (Ajustada por gl)} = 0.525253$$

$$\text{Error estándar del modelo} = 41.9136$$

Cuadro B.7. Análisis de varianza para el modelo de erosión acumulada por centímetro de escurrimiento

F.V.	gl	SC	CM	Fc.
Modelo	2	14206.5	7103.26	24.8578 **
Error	12	3429.1	285.76	
Total	14	17635.6		

$$R^2 = 0.805560$$

$$R^2 \text{ (Ajustada por gl)} = 0.773153$$

$$\text{Error estándar del modelo} = 16.9043$$

Cuadro B.8. Análisis de varianza para la infiltrabilidad

F.V.	gl	SC	CM	Fc	ns
Trata	2	0.0043571	0.0021785	1.906	0.1830
Error	15	0.0171442	0.0011429		
Total	17	0.0215013			

ns = Nivel de significancia.

Cuadro B.9. Análisis de varianza para la lámina de escurrimiento

F.V.	gl	SC	CM	Fc	nivel de sig.
Trata	2	4.9642	2.4821	2.029	0.1660
Error	15	18.3475	1.2232		
Total	17	23.3117			

Cuadro B.10. Análisis de varianza para la tasa de erosión

F.V.	gl	SC	CM	Fc	nivel de sig.
Trata	2	65.2298	32.6149	3.446	0.0587
Error	15	141.9780	9.4652		
Total	17	207.2078			

Cuadro B.11. Análisis de varianza para la erosión total en los sitios donde hubo escurrimiento

F.V.	gl	SC	CM	Fc	nivel de sig.
Trata	2	79475.23	39737.61	4.381	0.0373
Error	12	108857.32	9071.44		
Total	14	188332.55			

Cuadro B.12. Análisis de varianza para la erosión inicial

F.V.	gl	SC	CM	Fc	nivel de sig.
Trata	2	19934.10	9967.05	3.753	0.0542
Error	12	31871.43	2655.95		
Total	14	51805.53			

Cuadro B.13. Análisis de varianza para la erosión acumulada en relación al escurrimiento

F.V.	gl	SC	CM	Fc	nivel de sig.
Trata	2	9238.498	4619.25	6.601	0.0117
Error	12	8397.094	699.76		
Total	14	17635.592			

Cuadro B14.- Análisis de varianza para el factor erosionabilidad

F.V.	gl	SC	CM	Fc	nivel de sig.
Trata	2	135.363	67.682	2.782	0.093
Error	15	364.937	24.329		
Total	17	500.300			

PRUEBA DE MEDIAS METODO TUKEY ($P < 0.05$)

Cuadro B.16 : Producción inicial de sedimentos

Tratamiento	Media
3	88.6700 a
1	17.1500 ab
2	8.1100 b

Tukey = 79.3187

Cuadro B.17 : Producción total de sedimentos

Tratamiento	Media
3	162.4700 a
2	9.9520 b
1	5.3450 b

Tukey = 146.5898

Cuadro B.18 : Producción de sedimentos/cm de escurrimiento

Tratamiento	Media
3	58.5300 a
1	6.3200 b
2	5.6000 b

Tukey = 40.7136

* Valores con diferente literal son estadísticamente diferentes.