



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO  
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**EVALUACIÓN DE LA RUGOSIDAD GEOMÉTRICAMENTE  
ORDENADA DE LA SUPERFICIE DEL SUELO, BAJO LOS  
EFECTOS DE LA LLUVIA UTILIZANDO TÉCNICAS DE  
RECONSTRUCCIÓN DE IMÁGENES POR TRIANGULACIÓN Y  
ESCANEADO DE SUPERFICIES CON LÁSER**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:  
**MAESTRO EN CIENCIAS**

Presenta:

**CÉSAR AUGUSTO GRANADA ISAZA**

Dirigida por:

**DR. EUSEBIO JR. VENTURA RAMOS**

Santiago de Querétaro, Qro., Marzo del 2009.



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingenierías  
Maestría en Ciencias

**EVALUACIÓN DE LA RUGOSIDAD GEOMÉTRICAMENTE ORDENADA DE LA SUPERFICIE DEL SUELO, BAJO LOS EFECTOS DE LA LLUVIA UTILIZANDO TÉCNICAS DE RECONSTRUCCIÓN DE IMÁGENES POR TRIANGULACIÓN Y ESCANEADO DE SUPERFICIES CON LÁSER**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:  
**Maestro en Ciencias**

Presenta:

**César Augusto Granada Isaza**

Dirigido por:

**Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos**

**SINODALES**

**Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos**  
Presidente

Firma

**Dr. Alfonso Gutiérrez López**  
Secretario

Firma

**Dr. Aldo Iván Ramírez Orozco**  
Vocal

Firma

**Dr. Rafael Val segura**  
Suplente

Firma

**M.C. Juan José Escalante García**  
Suplente

**RUBRICA**  
Firma

  
Gilberto Herrera Ruíz  
Director de la Facultad  
Luis Gerardo Hernández Sandoval  
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Marzo del 2009.  
México

## RESUMEN

La erosión es un proceso dinámico que consiste en el desprendimiento, transporte y sedimentación de las partículas del suelo por los diferentes agentes erosivos del viento y del agua. Este proceso depende de factores como el clima, la topografía, la cobertura vegetal y el manejo. Sin embargo su regulación depende de mecanismos que tienen ocurrencia e interacción en la superficie de los suelos. La rugosidad superficial del suelo es uno de los factores que más afectan la erosión hídrica y en su forma natural se denomina rugosidad aleatoria, mientras que la creada o modificada con patrones ordenados, repetidos y de geometría definida artificialmente, se le considera rugosidad geoméricamente ordenada (RGO). La mayoría de los estudios se han realizado sobre la relación de la erosión y el escurrimiento con la rugosidad aleatoria, pero no con la rugosidad geoméricamente ordenada. El presente estudio tiene como objetivo estudiar el efecto de la RGO, y la aplicación combinada de yeso y poliacrilamida (PAM) en la superficie del suelo, en la erosión y el escurrimiento de un suelo bajo lluvia natural y simulada. Así mismo evaluar su evolución mediante técnicas de procesamiento de imágenes y escaneo de superficies con rayo láser. Los resultados obtenidos demuestran que la RGO redujo el escurrimiento total en un 54% y la erosión total en un 60%, con respecto a la parcela control. La combinación de yeso y PAM en la superficie del suelo con RGO resultó en una reducción adicional y significativa con valores totales de 77% y 96% para el escurrimiento y erosión, respectivamente. El decaimiento de la rugosidad geoméricamente ordenada en la superficie del suelo se redujo significativamente con la aplicación de yeso y poliacrilamida, con el beneficio adicional de una mejor calidad de agua de escurrimiento.

**(Palabras clave:** Rugosidad del suelo, erosión hídrica, escurrimiento, yeso, poliacrilamida, acondicionamiento de suelos, reconstrucción de imágenes)

## **SUMMARY**

Soil erosion is a dynamic process consisting of the detachment, transport and deposition of soil particles by the different water and wind erosive agents. This process depends on factors such as climate, topography, vegetative cover and management. However, its regulation depends on mechanisms occurring and interacting on the soil surface. Soil surface roughness is one of the main factors that affect water erosion. In its natural form, this feature is known as random roughness, while the one created or modified with ordered and repeated patterns of an artificial defined geometry, is known as Geometrically Ordered Roughness (GRO). Most of the studies have been performed on the relationship between erosion and runoff with random roughness, but not with geometrically ordered roughness. This study has the objective of studying the effect of GRO, and the combined surface application of gypsum and polyacrylamide (PAM), on erosion and runoff under natural and simulated rainfall, as well as evaluating its evolution using techniques of image analysis and laser scanning of surfaces. The results indicated that GRO reduced runoff by 54% and total erosion by 60% with respect to the control plot. Combined surface application of gypsum and PAM resulted in an additional significant reduction with values of 77% and 96% for runoff and erosion, respectively. Soil surface GRO decaying was reduced significantly with the combined application of gypsum and polyacrylamide, with the additional benefit of a better quality of runoff water.

**(Keywords:** Soil roughness, water erosion, gypsum, polyacrylamide, soil conditioning, images reconstruction)

A MIS PADRES  
A MI PATTY  
A MIS HERMANOS  
A COLOMBIA

## **AGRADECIMIENTOS**

Les agradezco a todas aquellas personas, amigos, maestros y compañeros que con su colaboración y apoyo ayudaron a mi formación académica y personal, y a la realización de esta investigación.

A la Universidad Autónoma de Querétaro.

Al mis compañeros y maestros del CIAQ.

A Patty por su comprensión y apoyo.

A mis amigos Flor, Liz, Jose, que con sus consejos y amistad me apoyaron.

A los Chelos su amistad, sus consejos, su ejemplo y apoyo incondicional.

A los Drs. Aldo y Alfonso por sus acertadas observaciones de la investigación.

En especial a mi asesor y amigo, el Dr. Eusebio, por su apoyo, sus consejos, su amistad, su confianza y por creer en mí desde el principio. Su conocimiento y sus valiosas aportaciones fueron parte primordial de esta investigación.

## ÍNDICE

	<b>Pág.</b>
<b>Resumen</b>	<b>i</b>
<b>Summary</b>	<b>ii</b>
<b>Dedicatorias</b>	<b>iii</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>iv</b>
<b>Índice</b>	<b>v</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>viii</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>ix</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	
1.1. Importancia del estudio	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Justificación	4
1.4. Objetivos e hipótesis	5
1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Objetivos específicos	5
1.4.3. Hipótesis	6
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA</b>	
2.1 La mecánica de la erosión hídrica	7
2.1.1 Mecanismos	9
2.1.2 Erosión entre surcos	10
2.1.3 Erosión en surcos	10
2.2 La rugosidad superficial del suelo	13
2.2.1 Definición y relación con el proceso erosivo	13
2.2.2 Nuevas metodologías para la medición de rugosidad	15
2.2.3 Rugosidad aleatoria (Ra)	18
2.2.4 Rugosidad geoméricamente ordenada	19
2.3 Reconstrucción de imágenes	20
2.3.1 Reconstrucción por triangulación	22
2.3.2 Reconstrucción a un factor de escala	22
2.3.3 Reconstrucción no calibrada	23
2.4 Acondicionadores de suelo	23
2.4.1 El sulfato de calcio di-hidratado	24

2.4.2	La poliacrilamida aniónica	24
<b>III. METODOLOGÍA</b>		
3.1	Evaluación de la dinámica de la rugosidad geoméricamente ordenada (RGO) con lluvia simulada	26
3.1.1	Cajas de erosión y escurrimiento	26
3.1.2	Suelo	27
3.1.3	Tratamientos	27
3.1.4	Simulación de lluvias	31
3.1.5	Toma de muestras	33
3.1.6	Toma de imágenes y medición de la rugosidad promedio	34
3.1.7	Esquema del experimento	37
3.2	Evaluación del efecto de la rugosidad geoméricamente ordenada (rgo) en la erosión hídrica y el escurrimiento bajo los efectos de la lluvia natural	38
3.2.1	Área de estudio	38
3.2.2	Parcelas de erosión y escurrimiento	39
3.2.3	Suelo	40
3.2.4	RGO	41
3.2.5	Acondicionadores	42
3.2.6	Instrumentación y muestreo	43
3.2.7	Procesamiento de muestras	48
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>		
4.1	Evaluación de la dinámica de la rugosidad geoméricamente ordenada (RGO) con lluvia simulada	50
4.1.1	Escurrimiento	50
4.1.2	Erosión	53
4.1.3	Rugosidad promedio (Ra)	55
4.1.4	Relación de la dinámica de la rugosidad y la erosividad acumulada	56

4.2	Evaluación del efecto de la rugosidad geoméricamente ordenada (rgo) en la erosión hídrica y el escurrimiento bajo los efectos de la lluvia natural	59
4.2.1	Precipitación	59
4.2.2	Escurrimiento	60
4.2.3	Erosión	62
4.2.4	Relación de la erosión hídrica y el escurrimiento superficial	64
4.2.5	Relación de la erosión hídrica y la erosividad	66
4.2.6	Calidad del agua de escurrimiento	67
<b>V. CONCLUSIONES</b>		<b>73</b>
<b>VI. REFERENCIAS</b>		<b>75</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>Pág.</b>
3.1	Dosis de Yeso y PAM para cada aplicación	43
4.1	Caracterización de las lluvias simuladas	50
4.2	Comparación de medias de datos de escurrimientos bajo lluvias simuladas	52
4.3	Comparación múltiple de medias de datos de erosión bajo lluvias simuladas de acuerdo a la prueba de Fisher	54
4.4	Comparación de medias de datos de rugosidad promedio (Ra)	56
4.5	Ecuación de decaimiento de rugosidad por tratamiento	58
4.6	Comparación de medias de datos de escurrimientos bajo lluvias naturales	62
4.7	Comparación de medias de datos de erosión bajo lluvias naturales	64
4.8	Comparación de medias de datos de concentraciones de sólidos suspendidos totales bajo lluvia natural	69
4.9	Comparación de medias de datos de pH bajo lluvia natural	70
4.10	Comparación de medias de datos de conductividad eléctrica bajo lluvia natural	72

## ÍNDICE DE FIGURAS (no)

<b>Figura</b>		<b>Pág.</b>
2.1	Configuración de la rugosidad geoméricamente ordenada	20
2.2	Geometría epipolar	22
3.1	Cajas de experimental control	28
3.2	Rueda Aqueel	29
3.3	Caja experimental rugosidad geoméricamente ordenada	30
3.4	Aplicación manual de yeso y PAM	31
3.5	Simulador de lluvia tipo Norton	32
3.6	Ubicación de pluviómetros digitales	34
3.7	Imágen requerida para reconstrucción bidimensional	35
3.8	Imágenes tomadas para reconstrucción bidimensional	35
3.9	Esquema de variables para medir Ra	37
3.10	Esquema general del experimento	37
3.11	Modulo hidrológico, Facultad de Ingeniería, UAQ	39
3.12	Parcelas erosión-escurrimiento tipo USLE	40
3.13	Parcela con RGO	42
3.14	Red de instrumentos	44
3.15	Sistema de captación de material erosionado y volumen de escurrimiento	47
4.1	Variación del escurrimiento superficial bajo lluvia simulada por efecto de la rugosidad superficial y aplicación de acondicionadores de suelo	52
4.2	Variación de la erosión bajo lluvia simulada por efecto de la rugosidad superficial y aplicación de acondicionadores de suelo	53
4.3	Variación de la rugosidad superficial bajo lluvia simulada por efecto de la rugosidad superficial y aplicación de acondicionadores de suelo	56
4.4	Relación entre rugosidad promedio (Ra) y la erosividad de la lluvia	57

4.5	Distribución de láminas de precipitación en los eventos monitoreados	60
4.6	Variación del escurrimiento superficial bajo lluvia natural por efecto de la rugosidad superficial y aplicación de acondicionadores de suelo	61
4.7	Variación de la erosión bajo lluvia natural por efecto de la rugosidad superficial y aplicación de acondicionadores de suelo	63
4.8	Relación de la erosión hídrica y el escurrimiento superficial bajo lluvia natural	65
4.9	Relación de la erosión hídrica y la erosividad bajo lluvia natural	67
4.10	Variación de la concentración de sólidos suspendidos totales del escurrimientos	68
4.11	Variación del pH de escurrimiento bajo lluvia natural por efecto de la rugosidad superficial y aplicación de acondicionadores de suelo	70
4.12	Variación de la conductividad eléctrica de escurrimiento bajo lluvia natural por efecto de la rugosidad superficial y aplicación de acondicionadores de suelo	72

## **I. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Importancia del Estudio**

En el 2005, la agricultura de temporal en México ocupó un área de 11,848,065 ha, de las cuales solo 3,908,079 ha se cultivaron bajo condiciones de riego (Semarnat, 2005). La superficie sembrada bajo temporal representa el 75% del total de la superficie agrícola nacional y bajo estas condiciones la producción agrícola se ve limitada por varios factores. En específico, en las zonas semiáridas de México, como lo son los estados de Querétaro, San Luis Potosí, Guanajuato, Nuevo León, Coahuila, entre otros, que cubren alrededor del 25% del territorio nacional (Villa, 1981), la escasez de agua de lluvia y su irregular distribución en el tiempo, hacen necesario que los agricultores utilicen prácticas agrícolas de conservación de suelo y agua. Sin embargo, las lluvias en estas regiones se caracterizan por ser torrenciales, con altas intensidades y corta duración (Wei *et al.*, 2007), que al caer sobre terrenos con pendientes significativas y desprotegidos de vegetación, aceleran los procesos de erosión y escurrimiento. Esto marca la importancia de buscar un medio que permita el uso eficiente del agua de lluvia y al mismo tiempo disminuya las pérdidas de suelo por erosión hídrica (Torres, 2007).

Recientemente se han utilizado nuevas tecnologías para incrementar la captación e infiltración de agua de lluvia en el suelo y disminuir la erosión y el escurrimiento a partir del cambio de la rugosidad superficial (Ventura *et al.*, 2002 y 2003), con impactos positivos en la producción de cultivos y en la reducción de la erosión y el escurrimiento en zonas semiáridas de pendientes leves. La eficiencia de esta práctica disminuye para lluvias de alta intensidad y pendientes moderadas a fuertes. Ante esta situación es necesario la estabilización

de la rugosidad superficial y el estudio de su evolución bajo efectos de la lluvia, mediante métodos rápidos y confiables de procesamiento de imágenes.

## **1.2. Antecedentes**

La rugosidad de una superficie en su estado natural se denomina rugosidad aleatoria, definida como la configuración que las condiciones naturales le han dado al terreno (Gómez y Nearing, 2005). Por otro lado, cuando esta rugosidad es intervenida o modificada con patrones ordenados y de geometría definida, se le considera rugosidad geoméricamente ordenada (RGO). La rugosidad geoméricamente ordenada es un concepto utilizado para la creación de impresiones en la superficie de los suelos, llamadas minireservorios, con el fin de incrementar la infiltración y controlar el escurrimiento. Uno de los métodos utilizados para la creación de estas impresiones es el uso de una rueda dentada, comercialmente conocida como la Rueda Aqueel® (Ventura *et al.*, 2003), la cual crea la rugosidad geoméricamente ordenada cuando, acoplada en forma de rodillo, rueda sobre la superficie de terrenos sueltos.

La tecnología ha sido probada con buenos resultados en condiciones de precipitaciones con intensidades bajas a moderadas y pendientes menores al cinco por ciento. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, las precipitaciones en zonas semiáridas se presentan de manera errática y con intensidades altas que propician grandes escurrimientos y erosión del suelo, como es el caso del estado de Querétaro en donde llueven alrededor de seiscientos milímetros por año y se registran tasas de pérdida de suelo por 781 T/ha . Las altas tasas de erosión y escurrimiento son también grandes problemas en zonas semiáridas ya que el desprendimiento de los suelos y la pérdida

de nutrientes afectan directamente la productividad (Yu *et al.*, 2003). Fuera del sitio de erosión, la producción de sedimentos azolva y contamina los cuerpos de agua (Rivera *et al.*, 2005).

Existen estudios que demuestran que la eficiencia de almacenamiento de agua en la superficie del suelo tiende a decrecer exponencialmente con relación a la lluvia acumulada y linealmente con relación a la pendiente (Planchon *et al.*, 2001). Un razonamiento lógico consideraría que la rugosidad afecta el almacenamiento del agua y el atrapamiento de partículas de suelo debido a las depresiones y barreras que disminuyen la velocidad del flujo, y por lo tanto el poder de desprendimiento y la capacidad de transporte (Darboux y Huang, 2005). Es importante mencionar que estos estudios se han realizado con rugosidad aleatoria y existe evidencia de que para este caso, la relación antes mencionada puede incluso ser inversa. Tal es el caso de Helming *et al.* (1998), quien mostró que superficies rugosas produjeron una mayor pérdida de suelo en comparación con superficies lisas debido sobretodo a la concentración del flujo.

No existen sin embargo reportes en la literatura, en relación a la evolución de la rugosidad geoméricamente ordenada bajo el efecto acumulado de la lluvia. Establecer relaciones entre estos dos parámetros y su efecto en la erosión y el escurrimiento es de suma importancia.

Bajo el supuesto de que la rugosidad geoméricamente ordenada disminuye por efecto de la energía de impacto de la lluvia, es importante su estabilización o al menos proporcionarle mayor resistencia mediante el uso de acondicionadores de suelo. En este sentido, existen antecedentes del uso de sulfato de calcio di-hidratado (yeso natural), y/o poliácridamida aniónica (PAM) para el incremento de la infiltración (Sojka y Surapaneni, 2000; Sivapalan, 2005) y reducción de la erosión y

el escurrimiento (Leib *et al.*, 2005; Bjorneberg y Aase, 2000; Cochrane *et. al.*, 2005; Yu *et al.*, 2003).

La combinación de una rugosidad geoméricamente ordenada y la aplicación de yeso y PAM, puede ser una alternativa al problema anteriormente planteado.

### **1.3. Justificación**

Ante la problemática existente en las zonas áridas y semiáridas, y la necesidad de hacer un uso más eficiente del agua de lluvia, a la vez que se controlan los procesos de erosión y escurrimiento, el desarrollo de tecnologías para este propósito queda plenamente justificado.

El uso de la rugosidad geoméricamente ordenada (RGO) ha demostrado ser una alternativa adecuada. Sin embargo, bajo condiciones de precipitaciones intensas y pendientes fuertes es necesario darle más resistencia a las impresiones creadas. Esto puede lograrse con el uso de acondicionadores de suelo como el yeso y la poliacrilamida.

De inicio es importante evaluar el efecto combinado de estos materiales, pero igual de importante es la evaluación de la evolución de la rugosidad con el tiempo, ya que normalmente la implementación de estas prácticas sería temporal y no permanente.

El uso de técnicas de manejo y procesamiento de imágenes puede ayudarnos a determinar los parámetros necesarios para evaluar el comportamiento dinámico de la configuración superficial del suelo y su relación con los procesos hidrológicos de erosión y escurrimiento, bajo los efectos de la lluvia en pendientes predeterminadas.

Este estudio se desarrolla bajo condiciones controladas de laboratorio utilizando un simulador de lluvia y los resultados preliminares se validan con un estudio bajo condiciones de lluvia natural, aportando una solución a la problemática agrícola de los pequeños productores en zonas áridas y semiáridas de México.

#### **1.4. Objetivos e hipótesis**

##### **1.4.1. Objetivo general**

Esta investigación tiene como objetivo general evaluar la rugosidad geoméricamente ordenada de la superficie del suelo y su relación con los procesos erosivos, bajo los efectos de la lluvia natural y simulada, utilizando técnicas de análisis de fotografías digitales y escaneo de superficies de suelo con rayos láser, así como la aplicación de yeso y poliacrilamida. De esta manera, se pretende obtener la ecuación de decaimiento que relaciona a las propiedades de la lluvia natural con la rugosidad geoméricamente ordenada de la superficie del suelo y la erosión hídrica, mediante un modelo matemático de regresión.

##### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Evaluar la geometría de la rugosidad ordenada de un suelo mediante técnicas de análisis de fotografías digitales con reconstrucción por triangulación y escaneo de suelo con láser.
- Determinar el efecto de la aplicación combinada de yeso y poliacrilamida aniónica (PAM) en los procesos hidrológicos de superficie bajo condiciones de lluvia natural y simulada.

- Determinar la relación matemática que existe entre la pérdida de la capacidad de almacenamiento de la rugosidad geoméricamente ordenada y la energía cinética de la lluvia.

### **1.4.3. Hipótesis**

La aplicación combinada de yeso y poliacrilamida aniónica disminuye la tasa de decaimiento de la rugosidad geoméricamente ordenada de la superficie del suelo, aumentando la efectividad de esta práctica para el control de la erosión y el escurrimiento.

## **II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. La mecánica de la erosión hídrica**

La erosión hídrica inicia en el momento en que las gotas de lluvia salpican en la superficie del suelo, la energía cinética de las gotas hace que se dé el rompimiento y separación de la estructura del suelo, provocando la erosión del mismo. Cuando se ha dado el rompimiento de la capa superficial del suelo se comienzan a crear pequeños canales de agua, los cuales transportan en su interior partículas de suelo que se van adhiriendo a su paso (Lal, 1994). Estas partículas de suelo pueden seguir totalmente el flujo del agua o depositarse en depresiones de la superficie del suelo. De esta manera la rugosidad del suelo sufre un cambio, ya que se dan dos fenómenos, uno la pérdida de partículas de suelo en zonas desprotegidas con altos índices de erodabilidad y altas pendientes, y dos, la sedimentación de partículas de suelo en zonas de acumulación o zonas de depósitos (Salcedo *et. al.*, 2005). Durante la primera etapa de la erosión hídrica, la formación del escurrimiento viene condicionada por la degradación de la estructura de la superficie del suelo. Esta degradación resulta particularmente en suelos susceptibles a la formación de costras superficiales en las que se observa una reducción notable no solo de la capacidad de infiltración de agua de lluvia, sino también la evolución de la rugosidad de tal modo que disminuye el volumen que ocupan las depresiones de la superficie susceptibles a almacenar agua (Bresson y Boiffin, 1999).

Las propiedades del suelo que intervienen en mayor medida en la erosión hídrica del suelo se suelen agrupar en tres categorías diferentes: a) la capacidad de la superficie y el conjunto del perfil para infiltrar agua de lluvia e impedir la formación de excedentes hídricos, b) la capacidad de la superficie del suelo para almacenar agua, en las depresiones de

mayores o menores dimensiones que se forman sobre la misma y c) la estabilidad de las partículas del suelo, o susceptibilidad al desprendimiento de las mismas, que solo interviene una vez que se forma una lámina de agua sobre la superficie (Vázquez y González, 2003; Le Bissonnais, 1988; Fernández, 1997; Taboada, 2001).

El flujo superficial predominantemente laminar tiene una capacidad baja de desprendimiento del suelo; sin embargo, si puede mover partículas previamente desprendidas de la superficie por el impacto de las gotas de lluvia. Los procesos de socavación y flujo superficial son responsables de la erosión en capas de poco espesor, una degradación relativamente uniforme de la superficie del suelo (Linsley *et. al.*, 1984).

El flujo concentrado implica mecanismos de desprendimiento y transporte de partículas relacionados con el esfuerzo hidráulico de corte del suelo. La capacidad de desprendimiento del flujo concentrado depende de las propiedades mismas del flujo, de la geometría del canal o surco y de las características del suelo, mientras que la capacidad de transporte está relacionada con la carga de sedimentos en el flujo (Toy *et. al.*, 2002).

El proceso de la erosión hídrica varía espacial y temporalmente en función de factores regionales y locales y la regulación de sus mecanismos depende en gran medida de la interacción de dichos factores en la superficie del suelo. La rugosidad de la superficie afecta significativamente la cantidad de erosión y escurrimiento generados en superficies de suelos (Gómez y Nearing, 2005).

### 2.1.1 Mecanismos

Los procesos erosivos tienen lugar bajo dos principios fundamentales. El primer principio se basa en la Carga de Sedimentos ( $q_s$ ), que corresponde al peso de los sedimentos producidos por el transporte de los agentes erosivos. Este principio se subdivide en dos condiciones: la primera es la limitante de desprendimiento, la cual tiene origen cuando el desprendimiento es bajo y la carga de sedimentos es baja, aún cuando la capacidad de transporte del flujo es mayor. La segunda condición es la limitante de transporte, la cual se da cuando el desprendimiento es alto pero la capacidad de transporte es baja. El segundo principio se basa en que la erosividad total del flujo se divide entre el desprendimiento y el transporte. Este principio maneja tres hipótesis: la primera es que si la carga de sedimentos es casi igual a la capacidad de transporte del flujo, el desprendimiento se reduce; la segunda es que la tasa de desprendimiento es igual a la capacidad de transporte cuando la carga de sedimentos es nula, y la tercera y última es que conforme se alcanza la carga de sedimentos la tasa de desprendimiento disminuye. Los tres principios fundamentales dan lugar a la ecuación fundamental de la erosión propuesta por Foster (1982).

$$\frac{\partial q_s}{\partial x} + \delta_s \frac{\partial (cy)}{\partial t} = Dr + Di \quad (2.1)$$

En donde:

$q_s$	Carga de sedimentos (kg/h)
$x$	La distancia aguas abajo (m)
$c$	La concentración de sedimentos (kg/m <sup>3</sup> )
$y$	Profundidad del flujo (m)
$t$	Tiempo (h)
$Dr$	Erosión en surcos (kg/m <sup>2</sup> s)
$Di$	Erosión entre surcos (kg/m <sup>2</sup> s)
$\delta_s$	Densidad del suelo (kg/m <sup>3</sup> )

### 2.1.2 Erosión entre surcos

La erosión causada básicamente por salpicado es la forma de erosión por flujo laminar o entre surcos y se define como aquella erosión debida al desprendimiento y al transporte de las partículas de suelo por impacto de la gota de agua y el flujo superficial. Según el concepto idealizado, la erosión laminar elimina uniformemente el suelo en estratos delgados, como consecuencia de la corriente superficial o flujo laminar que escurre en capas delgadas sobre el terreno en pendiente. Los estudios actuales sobre el mecanismo de la erosión, en los que se han utilizado técnicas fotométricas de exposición prolongada y de alta velocidad, indican que la forma idealizada de erosión laminar rara vez se presenta. El impacto de las gotas de lluvia combinado con el flujo superficial, forman los riachuelos microscópicos iniciales.

Estudios con simuladores de lluvia muestran que la erosión entre surcos varía con el cuadrado de la intensidad de la precipitación (Meyer, 1981). Por lo tanto, la erosión entre surcos puede ser descrita mediante la función Foster (1982):

$$D_i = K_i i^2 [2.96(\text{sen } \theta)^{0.79} + 0.56] C_i \quad (2.2)$$

En donde:

$D_i$	Erosión entre surcos ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ )
$I$	Intensidad de la lluvia ( $\text{mm/h}$ )
$K_i$	Factor de erodabilidad del suelo
$\theta$	Ángulo entre la horizontal y la superficie entre surcos
$C_i$	Factor por manejo de cultivo entre surcos

### 2.1.3 Erosión en surcos

Es la remoción de suelo debido a la concentración de flujo que fluye a través de pequeños canales llamados surcos. Es un proceso

hidráulico donde el esfuerzo cortante del flujo en la interfase suelo-agua desprende y transporta las partículas de suelo. El desprendimiento no es uniforme a lo largo del surco. Algunos surcos se forman por los desgajamientos pendiente arriba, mucha de la erosión se localiza en estos desgajamientos. La probabilidad de que surjan éstos, depende en buen grado de la forma del surco, textura del suelo, condiciones del suelo y la tasa de descarga. La erosión puede ocurrir también a lo largo de todos los surcos por el esfuerzo cortante ejercido en el canal por el flujo en los surcos. Este tipo de erosión puede socavar las laderas del surco, y cuando el peso del suelo socavado excede esta fuerza, entonces el suelo es desprendido y transportado dentro del surco por el flujo.

Según estudios de Foster (1982); la relación típicamente usada para describir la capacidad de desprendimiento en un surco es:

$$D_c = K_r (\tau - \tau_c) \quad (2.3)$$

En donde:

$D_c$	Capacidad de desprendimiento ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ )
$K_r$	Erodabilidad del suelo en el surco
$\tau_c$	Esfuerzo cortante crítico (Pa)
$\tau$	Esfuerzo cortante hidráulico de flujo (Pa)

Para Foster *et. al.* (1985), el esfuerzo cortante,  $\tau$ , es la variable hidráulica frecuentemente usada para describir la erosividad del suelo debida al flujo, y se expresa como:

$$\tau = \delta_w R_h S_f \quad (2.4)$$

En donde:

$\delta_w$	Densidad del agua ( $\text{kg/m}^3$ )
$R_h$	Radio hidráulico (m)
$S_f$	Gradiente hidráulico o pendiente del fondo

En forma general, la ecuación considera la sumatoria de fuerzas totales en dicho volumen de control, esto es, fuerzas de fricción, fuerzas gravitacionales, y fuerzas de presión. Por lo que, tomando como nivel de referencia el fondo del surco, se tiene que las fuerzas de presión son iguales y se cancelan para flujo uniforme. Las fuerzas de fricción y las de gravedad deben balancearse mediante la sumatoria de fuerzas igualada a cero. Entonces, la fuerza de fricción sobre la pared del surco, es igual al producto del esfuerzo cortante en la pared,  $\tau$ , y el área (A) sobre la que actúa, PL, donde P es el perímetro mojado de la sección transversal; es decir:

$$F_f = - \tau PL \quad (2.5)$$

En donde:

$F_f$	Fuerza de fricción (N)
$\tau$	Esfuerzo cortante en la pared (Pa)
PL	Área sobre la que actúa la fuerza ( $m^2$ )

De la anterior ecuación el signo negativo indica que la fuerza de fricción actúa en sentido contrario a la dirección del flujo. El peso del agua en la sección analizada es ( $\gamma AL$ ), donde ( $\gamma$ ) es el peso específico del fluido; la fuerza de gravedad actúa en el fluido y la componente del peso en el sentido de la pendiente es:

$$F_g = \gamma AL \sin \theta. \quad (2.6)$$

En donde:

$F_g$	Fuerza de gravedad (N)
$\gamma AL$	Peso del agua en la sección analizada (kg)
$\theta$	Angulo de la pendiente

El esfuerzo cortante incrementa con la tasa de descarga en el surco. El esfuerzo cortante no se distribuye uniformemente alrededor del perímetro mojado, incrementa desde cero en la superficie del agua a

su valor máximo en el fondo del surco. El esfuerzo cortante en este punto es cerca de 1.3 veces el promedio de la sección transversal completa de el surco (Graf, 1971). Si el esfuerzo cortante local excede el esfuerzo crítico de corte, el suelo es desprendido (Foster y Lane, 1983).

## **2.2. La rugosidad superficial del suelo**

### **2.2.1. Definición y relación con el proceso erosivo**

Se denomina rugosidad a la configuración de la superficie, a su micro topografía, desde la escala milimétrica hasta la métrica. La rugosidad de la superficie influye considerablemente en el reparto de agua de lluvia entre infiltración y escorrentía. El almacenamiento temporal de agua en las pequeñas depresiones que se forman entre agregados y terrones es un parámetro importante para modelar procesos erosivos (Vázquez y González, 2003).

Las propiedades físicas del suelo que intervienen en mayor medida en la erosión hídrica del suelo se suelen agrupar en tres categorías diferentes: a) la capacidad de la superficie y el conjunto del perfil para infiltrar agua de lluvia e impedir la formación de excedentes hídricos, b) la capacidad de la superficie del suelo para almacenar agua, en las depresiones de mayores o menores dimensiones que se forman sobre la misma y c) la estabilidad de las partículas del suelo, o susceptibilidad al desprendimiento de las mismas, que sólo interviene una vez que se forma una lámina de agua sobre la superficie (Vázquez y González, 2003; Le Bissonnais, 1988; Fernández, 1997; Taobada, 2001).

Durante la primera etapa de la erosión hídrica, la formación de escorrentía viene condicionada por la degradación de la estructura de la superficie del suelo. Esta degradación resulta particularmente en suelos

susceptibles a la formación de costras superficiales en las que se observa una reducción notable no sólo de la capacidad de infiltración de agua de lluvia, sino también la evolución de la rugosidad de tal modo que disminuye el volumen que ocupan las depresiones de la superficie susceptibles a almacenar agua (Bresson y Boiffin, 1999).

En cuanto a la rugosidad de la superficie del suelo, se ha podido comprobar su importancia como el factor del cual depende la erosión hídrica. La rugosidad se ve muy influenciada por las fuerzas erosivas inducidas por el impacto de la gota de lluvia y la escorrentía superficial. El impacto de las gotas de lluvia varía en función de las condiciones de la superficie, en particular la extensión y profundidad de los charcos de agua ya formados y de la pendiente local, que modifica el ángulo de impacto. La micro topografía también controla la altura del flujo laminar, su distribución y concentración. Actualmente se admite que, los principales procesos que intervienen en la erosión hídrica como la infiltración, la formación de excedente de agua y el desprendimiento pueden ser modelados con mayor eficiencia si se describen las condiciones de la superficie del suelo de los que dependen, en particular la rugosidad y la capacidad de almacenar agua en las depresiones asociadas a la superficie del suelo. Así mismo, la rugosidad interviene en el intercambio de aire entre el suelo y la atmósfera, la evaporación y el contenido hídrico, las propiedades térmicas, el balance energético y la distribución del tamaño de partículas (Helming *et. al.*, 1998).

La redistribución del suelo es un fenómeno complejo que implica la separación y el transporte de partículas de suelo, el almacenamiento y pérdida del agua lluvia y de la infiltración. La magnitud y la importancia relativa de estos procesos depende de una serie de factores, incluyendo el clima, el suelo y la rugosidad (Römken *et. al.*, 2001).

La redistribución del suelo se inicia en el momento en que las gotas de lluvia salpican en la superficie del suelo, la energía cinética de las gotas hace que se dé el rompiendo y separación de la estructura del suelo, provocando la erosión del mismo. Cuando se ha dado el rompimiento de la capa superficial del suelo se comienzan a crear pequeños canales de agua, los cuales transportan en su interior partículas de suelo que se van adhiriendo a su paso. Estas partículas de suelo pueden seguir totalmente el flujo del agua o depositarse en depresiones de la superficie del suelo (Darboux *et. al.*, 2001). De esta manera la rugosidad del suelo sufre un cambio, ya que se dan dos fenómenos, uno la pérdida de partículas de suelo en zonas desprotegidas con altos índices de erodabilidad y altas pendientes, y dos la sedimentación de partículas de suelo en zonas de acumulación o zonas de depósitos.

### **2.2.2. Nuevas metodologías para la medición de la rugosidad**

Son varias las metodologías que se han empleado para la determinación de la rugosidad del suelo (Hinojosa y Reyes, 2001; Pardini y Gallart, 2004; Samouelian *et. al.*,2004; Oelze *et. al.*,2003) , todas ellas con el objetivo de percibir la variación de la misma con relación a diferentes parámetros como la lluvia natural, el escurrimiento, el viento, la vegetación, etc.

El método más usado a niveles industriales para cuantificar la rugosidad se basa en el registro de perfiles de alturas mediante un rugosímetro o perfilómetro, y un análisis estadístico de los datos, que permite determinar parámetros como rugosidad media ( $R_a$ ) y Rugosidad raíz media cuadrática ( $R_{rms}$ ) por sus siglas en ingles. El rugosímetro o perfilómetro es utilizado particularmente para medir la rugosidad en

componentes comunes en la ingeniería, en áreas de la industria, la construcción, la investigación, etc. Su principio de operación es una punta fina que realiza un barrido en una línea recta, que al hacer contacto con la superficie convierte las variaciones de altura en impulsos eléctricos que permiten registrar los datos o graficarlos (Hinojosa y Reyes, 2001).

Pardini y Gallart (2004) publicaron su investigación acerca del análisis de la rugosidad superficial a partir de tecnología láser y métodos fractales, ellos propusieron calcular la rugosidad superficial de los suelos después de deshielos a partir de métodos antes utilizados pero combinados, como lo son mediciones con rayos láser y análisis fractales derivados de regresiones lineales.

Samouelian *et. al.* (2004) propuso el monitoreo en tres dimensiones del agrietamiento del suelo a partir de mediciones de resistividad eléctrica. El agrietamiento de los suelos formado por procesos naturales juega un papel clave en la transferencia de agua y gas. Sin embargo, los parámetros de agrietamientos del suelo son difíciles de caracterizar. El objetivo fue valorar la eficiencia de las inspecciones tridimensionales a partir de su resistencia eléctrica y así comprender las redes de agrietamiento del suelo. Una inspección eléctrica tridimensional fue llevada a cabo por una serie con electrodos Cu-CuSO<sub>4</sub> (los electrodos tenían un espaciamiento de 3 cm). Las medidas fueron hechas con dos orientaciones (0 y 90 grados) y en un bloque de suelo de (26 cm \* 30 cm \* 40 cm) mientras secó durante 18 días bajo condiciones controladas. Dos índices calculados de la resistividad aparente, fueron evaluados para discernir el grado de heterogeneidad del suelo: (1) un índice de anisotropía basado en el radio de la resistividad aparente a 0 grados y a 90 grados, (2) la

orientación del ángulo-serie que corresponde a la orientación anisótropa preferente (máxima resistencia). El índice de anisotropía proporcionó información de la presencia de agrietamiento y la orientación para una anchura de grieta mayor a 1mm en la primera pseudo-profundidad, mientras la orientación de ángulo-serie proporcionó información en la extensión de la grieta para la pseudo-profundidad entera. La información acerca de la presencia, posición, orientación y la extensión de grietas pueden ser obtenidas de un análisis de resistencia aparente obtenido por una inspección eléctrica tridimensional. Este análisis ayudará a discernir la red de la grieta a partir de la resistividad.

Oelze *et. al.* (2003) propuso la medición de la rugosidad a partir de mediciones acústicas y utilización de rayos láser. Para medir la rugosidad superficial del suelo en centímetros es importante modelar la erodabilidad local del suelo. Una técnica acústica fue examinada por su habilidad de cuantificar la rugosidad del suelo poroso en escalas de centímetro. El Backscatter acústico ofrece la posibilidad de un económico, móvil y rápido medio de estimar las propiedades estadísticas de las superficies del suelo. Cuatro muestras de suelos de 60cm por 60cm, con un área de 3.6 m<sup>2</sup> fueron construidas con diferentes datos de rugosidad. La rugosidad fue medida con un backscatter y un identificador de relieve de láser. Los espectros de la rugosidad para las muestras de superficie fueron obtenidos de perfiles de superficie medidos por el identificador láser y por la técnica acústica de backscatter. El acuerdo entre las dos técnicas para estimar la rugosidad estadística fue mostrada para hacer la diferencia cuando una cantidad adecuada de puntos de datos fue utilizada para elaborar los espectros de rugosidad. La técnica acústica de backscatter parece ser una alternativa potencial para cuantificar económica y rápidamente la rugosidad de la superficie del suelo.

### **2.2.3. Rugosidad aleatoria (Ra)**

La rugosidad está considerada como la configuración de la superficie del suelo a nivel micro y macro. Se considera que este factor afecta a la erosión hídrica, modificando las fuerzas erosivas inducidas por el impacto de la gota de lluvia y la escorrentía superficial. El impacto de las gotas de lluvia varía en función de las condiciones de la superficie, en particular la extensión y profundidad de las depresiones ya formadas y de la pendiente local, que modifica el ángulo de impacto. La micro topografía también controla el flujo laminar, su distribución y concentración. Actualmente se admite que, los principales procesos que intervienen en la erosión hídrica como la infiltración, la formación de excedente de agua y el desprendimiento pueden ser modelados con mayor eficiencia si se describen las condiciones de la superficie del suelo de los que dependen, en particular la rugosidad y la capacidad de almacenar agua en las depresiones asociadas a la superficie del suelo. Así mismo, la rugosidad interviene en el intercambio de aire entre el suelo y la atmósfera, la evaporación y el contenido hídrico, las propiedades térmicas y el balance energético y la distribución del tamaño de partículas (Helming *et. al.*, 1998). La rugosidad en su estado natural se denomina rugosidad aleatoria, que no es más que la configuración que las condiciones naturales le han dado al terreno.

Uno de los parámetros de rugosidad más usados en la ingeniería es la rugosidad promedio, (Ra). La rugosidad promedio se define como el promedio aritmético de los valores absolutos de las alturas medidas a partir de la línea central (Hinojosa y Reyes, 2001).

Matemáticamente la rugosidad promedio se define como:

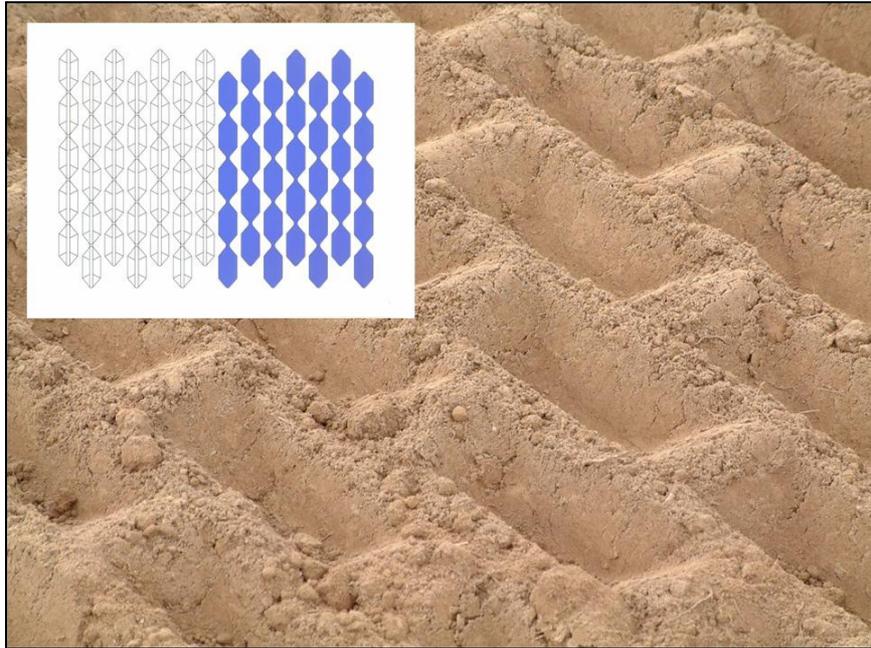
$$Ra = \int_0^L |y(x)| dx \quad (2.7)$$

En donde:

- Ra    Rugosidad promedio.
- L    Longitud de muestreo.
- Y    Alturas medias a partir de la línea central.
- X    Línea central.

#### **2.2.4. Rugosidad geoméricamente ordenada (RGO)**

Con el fin de controlar la infiltración y la escorrentía, se puede cambiar la forma de la superficie por medio de dispositivos que crean impresiones con geometría perfectamente definida, a esta forma de la superficie del suelo se le denomina "Rugosidad Geométricamente Ordenada (RGO)". Estas impresiones crean celdas bien definidas que tienen como propósito almacenar depósitos de agua y suelo, y de esta manera evitar el transporte de sedimentos suspendidos en el agua. Este fenómeno se conoce como redistribución de volúmenes de suelo y está relacionado con la cantidad e intensidad de la lluvia, además de otros factores como la pendiente (Ventura *et. al.*, 2002 y 2003).



**Figura 2.1. Configuración de la rugosidad geoméricamente ordenada.**

### **2.3. Reconstrucción de Imágenes**

Para analizar fotografías digitales se utilizan técnicas que tienen como principio la visión estereoscópica, la cual explica la observación tridimensional de los detalles de la superficie terrestre representada en las fotografías continuas (George *et. al.*, 2001). Cuando el hombre observa un objeto en condiciones normales y de manera natural, cada ojo recibe una imagen diferente por haber sido observado desde diferentes puntos. Ambas imágenes se fusionan en el cerebro y forman una imagen en tercera dimensión, es decir, el hombre percibe los objetos con profundidad o altura, con un largo y un ancho. En la fotogrametría tradicional se sustituye el terreno natural u objeto por dos fotografías aéreas consecutivas tomadas en el mismo lugar, obtenidas cada una desde diferente centro de proyección y ángulo de exposición, de manera que las imágenes recibidas por cada ojo son diferentes pero complementarias, las cuales al fusionarse en el cerebro, proporcionan de manera artificial una imagen tridimensional. Las imágenes

complementarias reciben el nombre de puntos homólogos (Palma y Sánchez, 2005).

Para el análisis en tres dimensiones de fotografías digitales de la Rugosidad Geométricamente Ordenada (RGO) del suelo, se emplea el mismo principio estereoscópico con la diferencia de que cambian las técnicas de recolección de imágenes, ya que en vez de utilizar fotografías aéreas se utilizarán fotografías digitales simultáneas, utilizando dos cámaras, con el fin de identificar el micro relieve de la superficie del suelo, además permitirá que estas imágenes tridimensionales no sólo sean fusionadas en el cerebro humano, sino que también tengan una representación gráfica del modelo digital de micro relieve.

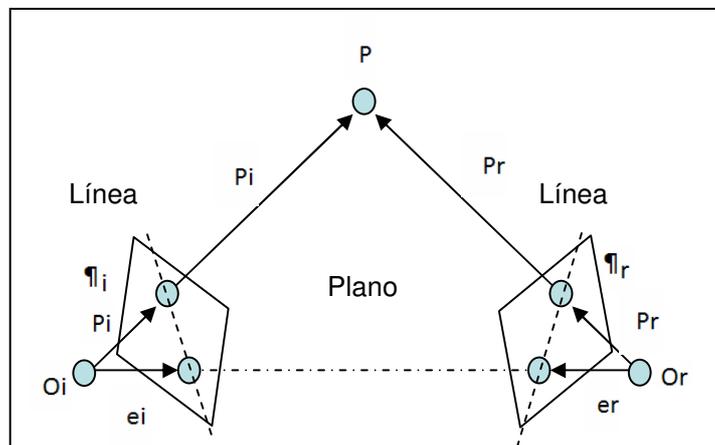
La calidad de la reconstrucción que se obtendrá dependerá de la información que se tenga sobre el sistema de captura de las imágenes. Esta reconstrucción, dependerá del conocimiento de los parámetros del sistema estéreo. Dependiendo de la información que se tenga, se dan tres casos, a) cuando se conocen tanto los parámetros intrínsecos (características internas de la cámara) como extrínsecos (parámetros externos de la posición de las cámaras) de la cámara, b) cuando solo se conocen los parámetros intrínsecos de la cámara, c) cuando no se conoce ningún tipo de parámetro, es decir, solo se conoce el conjunto de puntos en correspondencia.

En el primer caso será posible reconstruir la escena de forma única usando triangulación sobre los puntos en correspondencia. En el segundo caso se podrá obtener una reconstrucción y estimar los parámetros extrínsecos como la distancia hasta el punto apuntado y el ángulo de la toma de fotografías, pero esto será salvo un factor de escala indeterminado. En el tercer caso, se obtendrá también una

reconstrucción, pero esta será sólo una transformación proyectiva global desconocida.

### 2.3.1 Reconstrucción por triangulación

Al conocer todos los parámetros del sistema la reconstrucción es directa. Como se muestra en la figura 2.2, el punto  $P$  es proyectado en un par de puntos en correspondencia  $p_i$  y  $p_r$  que se sitúan en la intersección de los dos rayos definidos por los centros de proyección  $O_i$  y  $O_r$  y su respectivo punto de proyección  $p_i$  y  $p_r$ . Las ecuaciones de dichos rayos pueden ser calculadas, y por tanto su intersección, pero el efecto del ruido sobre las coordenadas de los puntos de proyección conducirá a que los rayos no se corten en el espacio; por tanto su intersección deberá ser estimada como el punto del espacio de menor distancia a ambos rayos. La estimación de este punto es el núcleo del algoritmo de triangulación.



**Figura 2.2. Geometría epipolar**

### 2.3.2 Reconstrucción a un factor de escala

Suponiendo que sólo se conocen los parámetros intrínsecos del sistema, a partir de ellos y del conjunto de puntos en correspondencias se calculan los parámetros extrínsecos y de esta manera se llega a la

reconstrucción en 3D de la escena. El método que se expone hace uso de una matriz esencial del sistema, por lo cual se necesitan al menos 8 puntos en correspondencias para poder estimarla.

A diferencia del método de triangulación en este método se desconoce la distancia base que existe entre las cámaras, por tanto la reconstrucción que se obtendrá será verdadera salvo una constante de escala. Este valor puede ser fijado del conocimiento de la distancia real entre dos puntos de la escena.

### **2.3.3 Reconstrucción no calibrada**

Este método demuestra que es posible calcular una reconstrucción 3D incluso en la ausencia de cualquier información sobre los parámetros intrínsecos y extrínsecos. El precio a pagar es que la reconstrucción que se obtiene es única salvo una transformación proyectiva global del mundo. Las figuras de diferentes reconstrucciones equivalentes pueden ser manejadas desde tres puntos de vista:

- A. Desde el punto de vista proyectivo, en donde se conservan las relaciones de incidencia y colinealidad.
- B. Desde el punto de vista afín, en donde se conserva el paralelismo entre las líneas.
- C. Desde el punto de vista euclídeo, en donde se conservan los ángulos y la ortogonalidad.

## **2.4. Acondicionadores de Suelo**

En la agricultura, la utilización de productos químicos es usual, ya que se encuentran en pesticidas, abonos, etc. En este caso, la aplicación de la combinación de yeso (Sulfato de calcio di hidratado) y poliacrilamida (Homopolímero de Acrilamida) en diferentes proporciones

ayuda a controlar la erosión superficial y el escurrimiento; para aumentar la infiltración y para favorecer procesos de las plantas como la absorción de nutrientes (Sojka y Surapaneni, 2000; Sivapalan, 2005).

#### **2.4.1. El sulfato de calcio di-hidratado**

El yeso permite que las partículas del suelo se floculen y se agrupen, mejorando la estructura del suelo, motivo por el cual se le considera como un mejorador del suelo. El calcio del yeso también fomenta el crecimiento de organismos en el suelo. En la agricultura el yeso se emplea para neutralizar suelos alcalinos y salinos, y mejorar la permeabilidad de los materiales arcillosos, además ayuda a que las plantas puedan absorber los nutrientes contenidos en el suelo. Por otra parte, mejora la estructura del suelo; ayuda a remover boro en suelos sódicos y a recuperar este tipo de suelos, a parar escurrimientos y erosión; corrige la acidez del subsuelo, incrementa la estabilidad de la materia orgánica del suelo; hace más eficiente el agua de irrigación de baja calidad y disminuye la toxicidad de metales pesados (Torres, 2007; Leib *et. al.*, 2005; Bjorneberg y Aase, 2000).

#### **2.4.2. La poliacrilamida aniónica (PAM)**

La poliacrilamida llamada PAM es un producto aniónico soluble en agua, usado para reducir al mínimo la erosión del suelo producto del agua y el viento. Además, este tipo de materiales también puede ser utilizado para el tratamiento de agua. Es un producto no tóxico y amigable con el ambiente usado en el control de la erosión. Su funcionamiento parte de la repulsión o atracción que puede ocurrir entre las partículas de la PAM y las arcillas de suelo, dependiendo de la carga que cada una de ellas tenga y esto a su vez puede dar como resultado

una dispersión o floculación, respectivamente (Torres, 2007; Cochrane *et. al.*, 2005; Yu *et. al.*, 2003).

### **III. METODOLOGÍA**

En este capítulo se aborda la metodología para la evaluación y análisis de la rugosidad geoméricamente ordenada (RGO) de la superficie del suelo, tanto bajo el efecto de lluvia simulada como de lluvia natural, a partir de fotografías digitales y escaneo con rayo láser, y se considera la metodología que permite la evaluación de la erosión y el escurrimiento superficial.

#### **3.1 Evaluación de la dinámica de la rugosidad geoméricamente ordenada (RGO) con lluvia simulada.**

La evaluación de la dinámica de la RGO bajo lluvia simulada se realizó en condiciones de laboratorio con la ayuda de un simulador de lluvias y cajas de empacadas con suelo, a las cuales se les aplicaron diferentes tratamientos. La meta en esta evaluación fue hacer uso de los instrumentos de estereoscopia digital, el escáner con láser y una óptima toma de imágenes digitales.

##### **3.1.1 Cajas de erosión y escurrimiento**

Las cajas utilizadas en el experimento fueron construidas en acero inoxidable calibre  $\frac{3}{4}$ ", con el fin de no tener problemas de corrosión del material por contacto con el agua y el suelo húmedo. Las dimensiones fueron de 1m x 1m, 3 paredes de 0.40m y una de 0.30m en la cual se colocó un vertedor triangular para la colecta de muestras de erosión y escurrimiento. Las cajas se colocaron con el fondo a 0.5m de la superficie del piso con una pendiente del 5%, esto debido a que las parcelas de erosión y escurrimiento tipo USLE con las cuales se validaran los datos tomados en laboratorio tienen una pendiente del 5%.

En el fondo de las cajas se realizaron cinco perforaciones con el objetivo de generar flujo vertical a succión libre.

### **3.1.2 Suelo**

El suelo utilizado para la experimentación es un Vertisol Pélico, representativo de la región del bajío, zona que se caracteriza por su clima semiárido. De acuerdo con la clasificación de suelos FAO-UNESCO(1987), los suelos de tipo Vertisol Pélico (Vp) son suelos que presentan grietas anchas y profundas en la época de sequía, son suelos muy duros, arcillosos y masivos, frecuentemente de color negro, gris o rojizo. Son de climas templados y cálidos con una marcada estación de sequía y otra lluviosa. Su vegetación natural es muy variada y su susceptibilidad a la erosión es alta.

Según el análisis realizado por el Laboratorio Nacional de Fertilidad de Suelos del INIFAP, el suelo utilizado tiene una Conductividad hidráulica de  $7.838 \times 10^{-6}$  m/s, un pH entre 7.5 y 8, una Densidad aparente de  $2.36 \text{ g/cm}^3$ , una Capacidad de campo de 46.5%, un Punto de marchitamiento permanente de 24.4% y un Contenido de arcilla, limo y arena de 20.52%, 46.36% y 33.12%, respectivamente. Este tipo de suelos se encuentra distribuido a lo largo de las zonas semiáridas de la republica Mexicana.

El suelo fue empacado en las cajas a una densidad similar a la reportada por el análisis laboratorio y simulando el trabajo de un implemento de labranza convencional.

### **3.1.3 Tratamientos**

Los tres tratamientos evaluados en condiciones de laboratorio con lluvia simulada fueron:

1. CONTROL
2. RUGOSIDAD GEOMÉTRICAMENTE ORDENADA (RGO)
3. RUGOSIDAD GEOMÉTRICAMENTE ORDENADA + SULFATO DE CALCIO DI-HIDRATADO + POLIACRILAMIDA ANIONICA

Cada tratamiento se aplicó en una caja para el estudio de la evolución de la RGO y su relación con la erosión y el escurrimiento superficial.

El tratamiento CONTROL corresponde a una superficie lisa y sirve de base de comparación para el efecto de los demás tratamientos. (Figura 3.1). Este tratamiento no recibe ningún tratamiento de rugosidad o aplicación de acondicionadores de suelo.



**Figura 3.1. Caja experimental control.**

El tratamiento de RUGOSIDAD GEOMÉTRICAMENTE ORDENADA (RGO) consistió en la creación de rugosidad con un patrón de bordos y

depresiones espacialmente repetidos, para lo cual se utilizó una rueda dentada conocida comercialmente como rueda Aqueel™(Figura 3.2). La rueda consta de seis dientes, está hecha de un material elastomérico de poliuretano microcelular, el cual es autolimpiable, de larga duración, y con una excelente resistencia a la abrasión. El ancho de cada rueda es de 115mm y tiene un diámetro al borde de los dientes de 80mm. Tres ruedas se colocaron en un eje formando un rodillo de 345mm. Las impresiones se realizaron previas a los eventos de lluvia simulada en suelo suelto con una consistencia friable en húmedo y en sentido perpendicular a la pendiente de las cajas (Figura 3.3). El suelo se humedeció con el simulador de lluvia aplicando el agua de forma simultánea en las otras dos cajas para tener niveles de humedad similares al inicio de las simulaciones, ya que no se midió humedad inicial.



**Figura 3.2. Rueda Aqueel™.**

En lo que respecta al tratamiento combinado de RUGOSIDAD GEOMÉTRICAMENTE ORDENADA con adición superficial de SULFATO DE CALCIO DI-HIDRATADO y POLIACRILAMIDA ANIONICA, estos acondicionadores se aplicaron posteriormente a la impresión de la RGO

y previo al inicio de la simulación de lluvia (Figura 3.4). En las tres simulaciones se aplicaron dosis equivalentes decrecientes de yeso: 5, 2 y 1 ton/ha, respectivamente, y una sola dosis equivalente de PAM: 20kg/ha (Torres, 2007).



**Figura 3.3. Caja experimental Rugosidad Geométricamente Ordenada.**



**Figura 3.4. Aplicación manual de Yeso y PAM.**

### **3.1.4 Simulación de lluvia**

La simulación de lluvia se realizó con un simulador de lluvias tipo Norton (Figura 3.5), el cual cuenta con un sistema de cuatro boquillas aspersoras alimentadas por una bomba de ½ HP. El simulador es controlado por un sistema automatizado que permite un movimiento oscilatorio de las boquillas aspersoras y cuya frecuencia está directamente relacionada con la intensidad aplicada. Las simulaciones se realizaron durante una hora y media con 150 oscilaciones programadas. La intensidad de lluvia real fue monitoreada con pluviómetros digitales que trabajan mediante un mecanismo de balancín (Tipin baken), que registra pulsaciones cada 0.25mm, la cuales son registradas y almacenadas con el tiempo en un dataloger programado para almacenar datos cada 10 minutos.



**Figura 3.5. Simulador de lluvia tipo Norton.**

La energía cinética de la lluvia se determinó utilizando la ecuación de Foster (1982):

$$E_c = \sum (0.29 * (1 - 0.72 \text{EXP} (-0.082 * (i)) * L) \quad (3.1)$$

En donde:

- Ec Energía cinética de un evento de precipitación.
- I Intensidad para cada intervalo de tiempo.
- L Lámina de precipitación para cada intervalo de tiempo.

La erosividad de la Lluvia o Factor R de cada evento se determinó multiplicando la energía cinética total del evento por la intensidad máxima en 30 minutos continuos ( $I_{30}$ ), es decir (Weltz *et. al.*, 1998):

$$R = Ec * I_{30} \quad (3.2)$$

En donde:

- R Erosividad de la lluvia.
- Ec Energía cinética de un evento de precipitación.
- I<sub>30</sub> Intensidad máxima en 30 minutos durante el evento.

### **3.1.5 Toma de muestras**

Las muestras de erosión y escurrimiento se tomaron cada 10 minutos en forma simultánea en los tres tratamientos utilizando botellas de plástico de boca ancha (Figura 3.6). Con el tiempo de muestreo predeterminado y un procesamiento gravimétrico, se calculó el volumen y lámina de escurrimiento, así como la tasa de erosión. Las muestras fueron inicialmente pesadas, decantadas y secadas en horno a 105 ° C hasta peso constante (Salcedo *et. al.*, 2005).

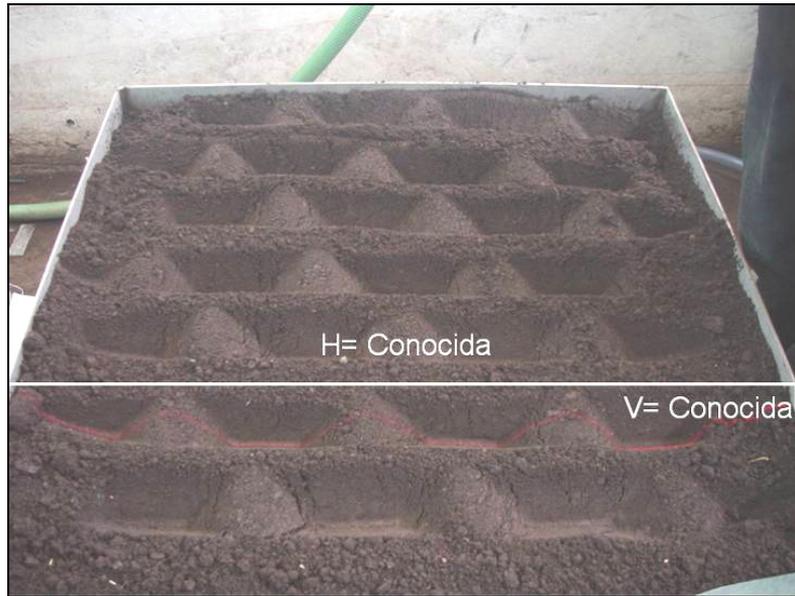
Los datos fueron analizados estadísticamente tanto para obtener medidas descriptivas como para análisis de regresión.



***Figura 3.6. Ubicación de los pluviómetros digitales.***

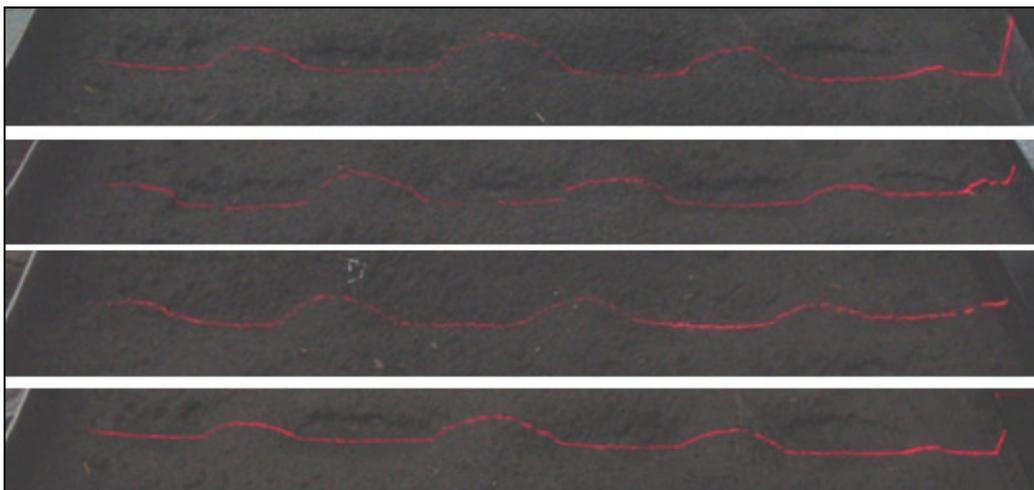
### **3.1.6 Toma de imágenes y medición de la rugosidad promedio**

Con el fin de evaluar la rugosidad promedio ( $R_a$ ), antes, durante y después de cada simulación se tomaron imágenes digitales de la proyección de un rayo láser lineal, en sentido opuesto a la pendiente de las cajas y con un ángulo entre 30 y 45 grados, para una visualización completa. Con la distancia horizontal (H) y vertical (V) de cada punto en la imagen se pudo realizar una reconstrucción bidimensional del recorrido del rayo por la superficie del suelo, y de esta manera obtener datos para calcular la rugosidad promedio (Figura 3.7).



**Figura 3.7. Imagen requerida para reconstrucción bidimensional.**

Las imágenes fueron tomadas en los tres tratamientos para las tres repeticiones de la simulación de lluvia, conservando el mismo intervalo de tiempo de la medición de la precipitación y el escurrimiento. En cada intervalo de tiempo se tomaron cuatro imágenes de cada caja y los datos se promediaron para calcular una rugosidad promedio para el control, RGO y RGO+Yeso+PAM (Figura 3.8).



**Figura 3.8. Imágenes tomadas para reconstrucción bidimensional.**

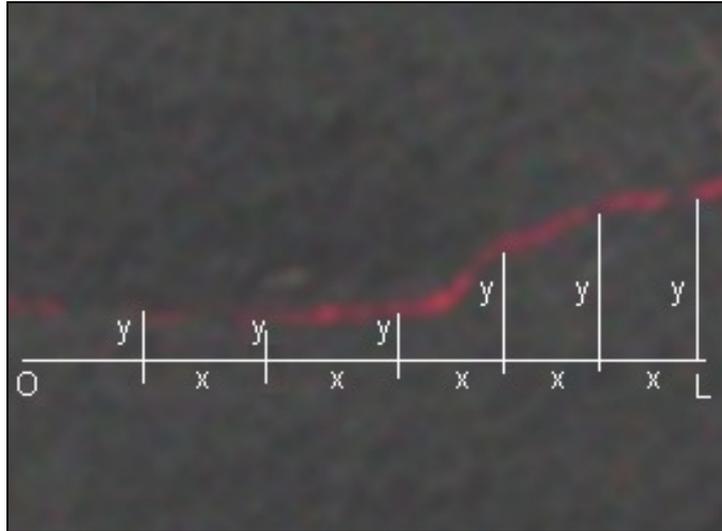
Las imágenes tomadas se exportaron a formato CAD en donde por medio de comandos de alineación, se redimensionaron a medidas reales a partir de la distancia vertical y horizontal conocidas de cada imagen. Una vez realizado el redimensionamiento se digitalizó la proyección del rayo láser a través de la superficie, permitiendo recrear la configuración real de la misma. Los datos obtenidos de la digitalización se exportaron a tablas de cálculo en donde se calculó primero la rugosidad promedio para cada imagen y después la rugosidad promedio para cada tratamiento.

La rugosidad promedio (Ra) es el promedio aritmético de los valores absolutos de las alturas medidas a partir de la línea central y se calculó con la siguiente ecuación (ver figura 3.9):

$$Ra = \int_0^L |y(x)| dx \quad (3.3)$$

En donde:

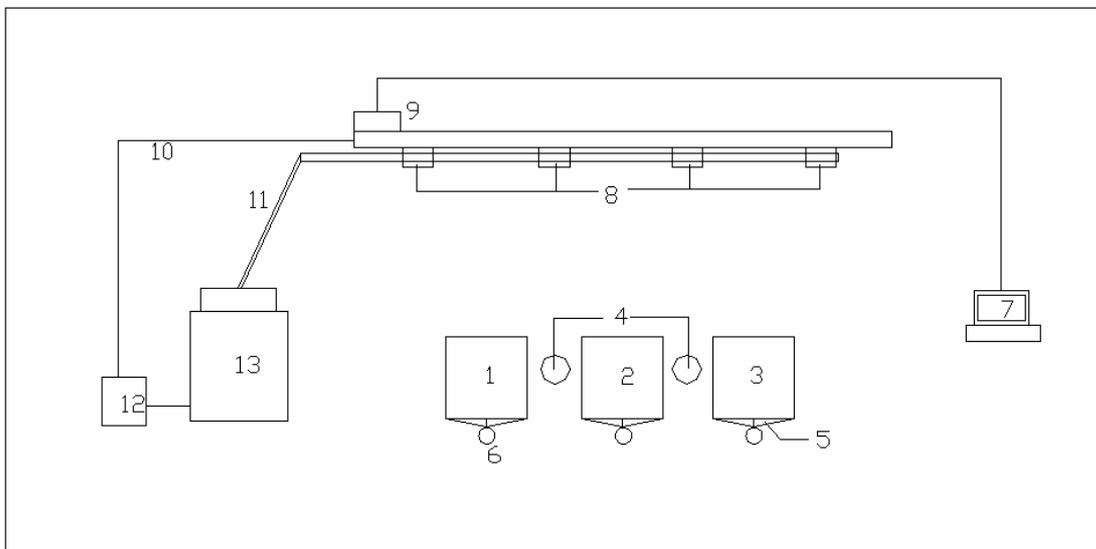
- Ra    Rugosidad promedio.
- L    Longitud de muestreo.
- y    Alturas medias a partir de la línea central.
- x    Línea central.



**Figura 3.9. Esquema de variables para medir Ra.**

### 3.1.7 El esquema del experimento

El esquema del montaje del experimento se puede observar en la fig. 3.9.



**Figura 3.10. Esquema general del experimento.**

Según la figura 3.10, el experimento se conforma básicamente por: caja control (1), caja con RGO (2), caja con RGO, Yeso y

Poliacrilamida (3), 2 pluviómetros digitales (4), vertedores triangulares a dos aguas (5), recipientes de recolección de muestras de flujo superficial (6), sistema de control automatizado de lluvia (7), 4 aspersores (8), sistema de motor y engrane (9), sistema de conducción de agua a presión (10), sistema de recolección de agua de exceso (11), sistema de bombeo (12) y tanque de almacenamiento de agua (13).

### **3.2 Evaluación del efecto de la rugosidad geoméricamente ordenada (RGO) en la erosión hídrica y el escurrimiento bajo los efectos de la lluvia natural**

Con el fin de evaluar el efecto de la RGO en la erosión hídrica y el escurrimiento superficial bajo condiciones de lluvia natural, se llevaron a cabo monitoreos de eventos reales de lluvia en tres parcelas de erosión-escurrimiento tipo USLE. En esta fase se evaluaron los mismos tratamientos que en el estudio con lluvia simulada: Control, RGO, RGO+Yeso+PAM.

#### **3.2.1 Área de estudio**

La investigación se realizó en el módulo hidrológico de la Facultad de Ingeniería (FI) de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ). El módulo hidrológico se encuentra localizado en las coordenadas 20°35'23.16" de latitud y -100°24'43.92" de longitud, a 1813 metros sobre el nivel del mar. El clima del sitio es templado semiseco, caracterizado por un verano calido. La temperatura media anual es de 18°C, siendo mayo y junio los meses mas calurosos con temperaturas máximas de 36°C y diciembre y enero los mas fríos con temperaturas mínimas de -3°C. La precipitación anual es de 555 mm y los vientos predominantes son del Noreste, Sur y Sureste. (Figura 3.11)



**Figura 3.11. Módulo hidrológico, Facultad de Ingeniería, UAQ.**

### **3.2.2 Parcelas**

Las parcelas experimentales de erosión-escurrimiento tipo USLE son de 1.9 m de largo y 6.0 m de ancho, una pendiente del 6.5% y suelos representativos de la región. Se encuentran divididas con láminas galvanizadas insertadas 15cm en el suelo y con un bordo libre de 20cm para evitar la transferencia de escurrimientos superficiales y humedad. (Figura 3.12)



**Figura 3.12. Parcelas erosión-escurrimiento tipo USLE.**

### **3.2.3 Suelo**

El tipo de suelo utilizado para la experimentación es un Vertisol Pélico, representativo de la región del bajío, zona que se caracteriza por su clima semiárido. Los suelos de tipo Vertisol Pélico (Vp), son suelos que presentan grietas anchas y profundas en la época de sequía, son suelos muy duros, arcillosos y masivos, frecuentemente de color negro, gris o rojizo. Son de climas templados y cálidos con una marcada estación de sequía y otra lluviosa. Su vegetación natural es muy variada. Su susceptibilidad a la erosión es alta (FAO-UNESCO, 1987).

Según el análisis realizado por el Laboratorio Nacional de Fertilidad de Suelos del INIFAP, el suelo utilizado tiene una conductividad hidráulica de  $7.838 \times 10^{-6}$  m/s, un potencial de hidrogeno entre 7.5 y 8, una densidad aparente de  $2.36 \text{ g/cm}^3$ , una capacidad de campo de 46.5%, un punto de marchitamiento de 24.4% y un contenido de arcilla de 20.52%, de limo de 46.36% y de arena de 33.12%.

### **3.2.4 RGO**

De la misma manera que se llevó a cabo en las experimentaciones en laboratorio, para dar a la superficie del suelo la configuración de RGO, se utilizó el aditamento denominado rueda Aqueel™, la cual es una rueda con seis dientes con geometría completamente definida, hecha de elastomérico de Poliuretano Micro celular el cual es autolimpiable, de larga duración, y con una excelente resistencia a la abrasión, con un ancho de 115mm y un diámetro de 80mm.

El suelo se manejó y preparó realizando procesos de labranza, de tal manera que la consistencia y apariencia fueran similares a las realizadas en campos preparados para cultivos. Luego se utilizaron tres ruedas Aqueel™, para tener finalmente una rueda con tres series dentadas de un ancho final de 345mm. Las impresiones se realizaron en contra de la pendiente de la parcela, haciendo fricción con el peso del cuerpo hacia el suelo con el fin de que las impresiones adquirieran la forma exacta de los dientes de la rueda Aqueel™. (Figura 3.13)



***Figura 3.13. Parcela con RGO.***

### **3.2.5 Acondicionadores**

La aplicación de la combinación de yeso (Sulfato de calcio dihidratado) y poliacrilamida (Homopolímero de Acrilamida) en diferentes proporciones es realizado para ayudar a controlar la erosión superficial y el escurrimiento; para aumentar la infiltración y para favorecer procesos químicos del suelo.

Para cada una de las tres experimentaciones en el laboratorio se aplicaron diferentes dosis de yeso y poliacrilamida, las dosis se muestran en la tabla 3.1. (Torres, 2007).

**Tabla 3.1. Dosis de Yeso y PAM para cada aplicación.**

Repetición	Yeso (Ton/Ha)	Poliacrilamida (Kg/Ha)
Primera	5	20
Segunda	2	20
Tercera	1	20

Debido a que el estado físico de los productos utilizados fue granular, las diferentes dosis de cada producto se mezclaron y se esparcieron manualmente sobre la parcela de manera uniforme en toda el área.

### **3.2.6 Instrumentación y muestreo**

Con el fin de evaluar el comportamiento y la eficiencia de los tratamientos propuestos para la regulación de la erosión hídrica y el escurrimiento superficial, fueron medidas algunas variables mediante la utilización de instrumentos, ver figura 3.14, los cuales se encontraban monitoreando las 24 horas del día con el fin de obtener datos en tiempo real, además fue muy importante la calibración y la estandarización de los métodos de medición para obtener datos completamente confiables. Las variables medidas fueron la precipitación, el escurrimiento y la erosión, según la configuración de la parcela y el equipo dispuesto.



**Figura 3.14. Red de instrumentos.**

Para la medición de la precipitación se utilizaron cinco pluviómetros digitales de boca angosta, localizados en las instalaciones del módulo hidrológico. Estos pluviómetros trabajan mediante un mecanismo de balancín (Tipin baken), que registra pulsaciones cada 0.25mm, la cuales son registradas y almacenadas con el tiempo en un dataloger programado para almacenar datos cada 5 minutos. Los pluviómetros estuvieron en funcionamiento durante las temporadas monitoreadas de los años 2007 y 2008. Los datos fueron descargados cada 24 días con el fin de no perder ningún evento de lluvia. Además los pluviómetros fueron monitoreados constantemente con el fin de verificar su funcionamiento.

Los pluviómetros registraron la fecha del evento, la duración y la lámina de precipitación, datos con los cuales se calculó la intensidad, la lámina acumulada, la variable I30, que es la intensidad máxima

obtenida por evento en un intervalo de 30 minutos y la energía cinética del evento.

Lámina acumulada: La lámina total o lámina acumulada de precipitación se calculó realizando la sumatoria de las láminas obtenidas por cada intervalo de tiempo, desde el inicio hasta el final del evento, teniendo en cuenta que los eventos son independientes después de transcurridas seis horas sin precipitación (Salcedo *et. al.*, 2005).

Intensidad: La intensidad de la lluvia es la tasa de precipitación con respecto al tiempo, por lo cual su cálculo se realizó dividiendo la lámina de precipitación entre el intervalo de tiempo. Ver ecuación 3.4.

$$i = L/t \quad (3.4)$$

En donde:

- t Tiempo del intervalo.
- i Intensidad para cada intervalo de tiempo.
- L Lámina de precipitación para cada intervalo de tiempo.

Energía cinética: La energía cinética de la lluvia es la energía con la cual las gotas de lluvia impactan en la superficie que las recibe, en este caso es la energía con la cual las gotas de lluvia impactan la superficie del suelo. El cálculo de la energía cinética de las gotas de lluvia se realizó utilizando la ecuación 3.1

Erosividad: La erosividad (R) es la capacidad que tiene la precipitación de generar desprendimiento en la superficie del suelo, por lo cual es el inicio del proceso de la erosión hídrica. La erosividad se calculó utilizando la ecuación 3.2.

Para cuantificar el escurrimiento y la erosión se utilizaron vertedores a dos aguas con salida en el medio al final de cada una de las parcelas de escurrimiento con el fin de concentrar en un solo punto el escurrimiento superficial. Del vertedor de cada parcela sale un tubo de 5 pulgadas de diámetro que recolecta todo el escurrimiento y lo lleva hasta un sistema de captación que se encuentra al frente de cada parcela. Este sistema de captación de erosión y escurrimiento cuenta con un tanque de 200 litros de capacidad, que a su vez lleva en su interior un tanque de 20 litros, en donde se almacenan los sedimentos mas pesados. También se cuenta con un sistema de recolección de muestras para eventos de mayor magnitud, ya que en la parte superior del primer tanque se encuentran diez orificios del mismo diámetro y la misma altura que desalojan el escurrimiento cuando se pasa la capacidad del primer tanque, uno de estos orificios esta conectado por medio de una manguera a otro tanque de 150 litros de capacidad. (Figura 3.15).



**Figura 3.15. Sistema de captación de material erosionado y volumen escurrimiento.**

Una vez terminado cada evento de precipitación se midió la altura de cada uno de los tanques, con el fin de calcular el volumen total de escurrimiento. De cada uno de los tanque se tomaron muestras representativas, para lo cual se trató de lograr una mezcla homogénea por medio de agitación e inmediatamente de agitar la muestra se introdujo un recipiente de plástico de boca ancha de 900 cm<sup>3</sup> boca abajo para luego girarlo y con un movimiento ascendente subirlo desde el fondo hasta la superficie, verificando que el recipiente de plástico quede completamente lleno y sin burbujas de aire. Una vez tomadas las alturas y las muestras se prosiguió con el vaciado y limpieza de los tanques para tener el sistema listo para el siguiente evento.

### **3.2.7 Procesamiento de muestras**

Las muestras envasadas en recipientes se llevaron al laboratorio donde por medio de métodos gravimétricos se calculó el volumen total de escurrimiento y la tasa de entrega de sedimentos. El método utilizado para el cálculo del volumen de agua escurrida y la tasa de entrega de sedimentos consta de los siguientes pasos:

Paso 1: Pesar las muestras obtenidas. Este peso se denominó peso del bote+agua+suelo.

Paso 2: Las muestras fueron llevadas a un horno a una temperatura de 104° C, con el fin de sólo evaporar el agua y no quemar pequeñas partículas finas de la muestra, una vez obtenido un peso seco constante de las muestras se pesaron para obtener el peso del suelo.

Paso 3: Una vez obtenido el peso del suelo se procedió a pesar el bote limpio y seco. Con el peso del bote y el peso del suelo se calculó el peso del agua, el cual fue convertido a volumen utilizando el valor de la densidad del agua.

Paso 4: El valor obtenido del peso del suelo se dividió entre el volumen de agua para obtener la concentración de sedimentos en Ton/m<sup>3</sup>.

Paso 5: La concentración de sedimentos se multiplicó por el volumen total de escurrimiento, obteniendo el peso total de los sedimentos, este peso se dividió en el área de las parcelas para obtener finalmente la tasa de entrega de sedimentos en Ton/ha.

Con el objeto de evaluar la respuesta química de los tratamientos propuestos, a las muestras llevadas al laboratorio también se les midió

el potencial de hidrogeno (pH) y la conductividad eléctrica en  $\mu\text{S}$ , utilizando un potenciómetro Horiba modelo D-24.

Una vez obtenidos estos valores para cada evento de precipitación y para cada parcela, se agruparon en una hoja de cálculo y se analizaron estadísticamente las variables medidas.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSION

En este capítulo se presentan los resultados del análisis y evaluación de la rugosidad geoméricamente ordenada (RGO) de la superficie del suelo, tanto bajo el efecto de lluvia simulada como de lluvia natural, a partir de fotografías digitales y escaneo con rayo láser. Se considera además la relación que existe con la erosión y el escurrimiento superficial.

### 4.1 Evaluación de la dinámica de la rugosidad geoméricamente ordenada (RGO) con lluvia simulada.

En la tabla 4.1, se pueden observar las características generales de las lluvias simuladas aplicadas de forma simultánea al los tratamientos estudiados.

**Tabla 4.1. Caracterización de las lluvias simuladas.**

Fecha	Duración	Intensidad media	Lámina	Erosividad acumulada
	(min)	(mm/h)	(mm)	(MJ.mm/ha.h)
24 de julio 2008	90	13.4	20.1	327.6
25 de septiembre 2008	90	13.7	20.6	339.5
10 de octubre 2008	90	7.5	11.3	109.7

En general, las lluvias fueron de intensidad moderada, con las os primeras alrededor de 13 mm/h y la tercera de 7.5 mm/h. La lamina total aplicada fue de alrededor de 50 mm y la erosividad acumulada de alrededor de 775 MJ.mm/ha.h.

#### 4.1.1 Escurrimiento

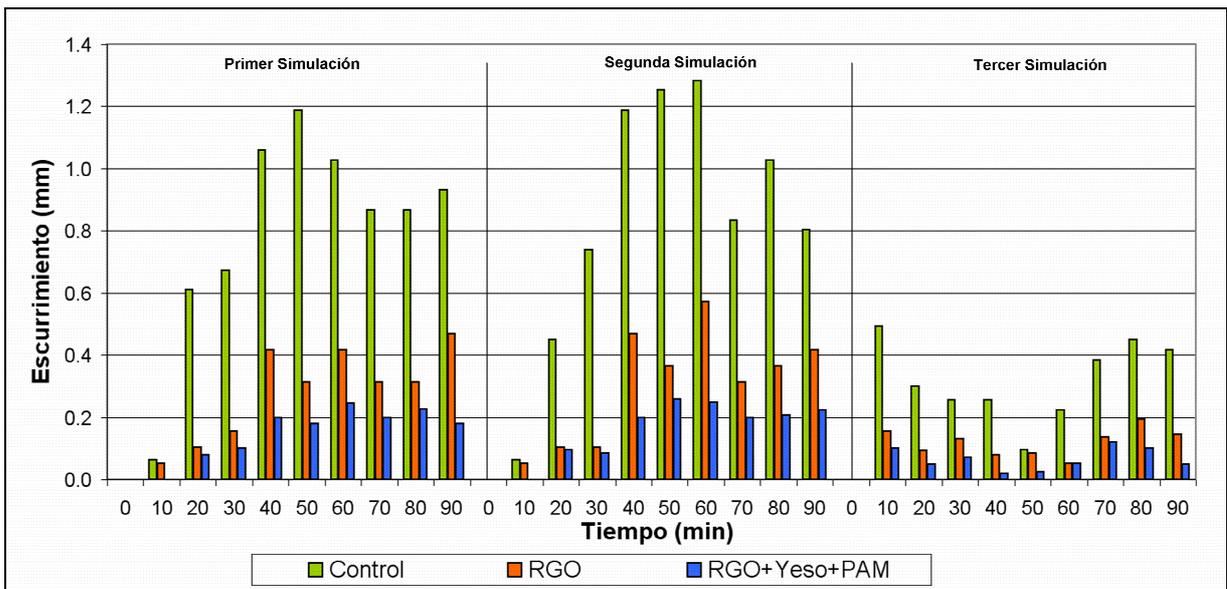
La dinámica del escurrimiento superficial para las tres simulaciones a intervalos de 10 minutos en los tres tratamientos estudiados se presenta en la Figura 4.1. De manera general, para el

tratamiento control el escurrimiento total acumulado fue de 17.8 mm. De manera particular, el valor correspondiente para la primera, segunda y tercera simulación fue 7.2 mm, 7.6 mm y 2.9 mm, respectivamente. En el caso del tratamiento RGO, el escurrimiento acumulado para los tres eventos fue de 6.4 mm, de los cuales 2.5 mm correspondieron a la primera simulación, 2.8 mm en la segunda y 1.1 mm en la tercera. El escurrimiento total para el tratamiento RGO+Yeso+PAM fue el más bajo de los tres tratamientos, con un valor de 3.5 mm, cuya distribución fue de 1.4 mm para la primera simulación, mientras que los valores respectivos de la segunda y tercera simulación fueron 1.5 mm y 0.58 mm.

Los valores de escurrimiento superficial reportados en el párrafo anterior fueron los primeros indicios de la eficiencia de los tratamientos propuestos. En todos los casos, el escurrimiento del tratamiento control fue significativamente mayor que los otros dos tratamientos. En general, la RGO produjo una disminución del escurrimiento promedio de 64% con respecto a control, mientras que para el caso de la RGO+Yeso+PAM la reducción promedio respectiva fue del 80%. La disminución del escurrimiento superficial comprueba que la reconfiguración de la superficie del suelo disminuye afecta considerablemente la partición del agua de lluvia entre infiltración y escurrimiento (Bresson y Boiffin, 1999; Vázquez y González, 2003), favoreciendo el primer proceso; por consecuencia esta condición es un factor de regulación de la erosión hídrica (Helming *et. al.*, 1998).

Los resultados del análisis de varianza y la prueba de comparación de medias de acuerdo al procedimiento de mínima diferencia significativa (LSD) de Fisher, con un nivel de confiabilidad del 95%, indicaron una diferencia estadísticamente significativa entre el control y la RGO, y el entre el control y la RGO+Yeso+PAM, pero no entre la RGO y la RGO+Yeso+PAM, indicando que la aplicación de yeso y PAM en

estas condiciones de experimentación no caso una reducción significativa del escurrimiento. Esto se debe probablemente a que las intensidades evaluadas no fueron de la magnitud necesaria para causar una diferencia entre estos dos tratamientos. La Tabla 4.2 muestra la conformación de grupos, tal como se indica por la posición de los tratamientos en las columnas.



**Figura 4.1. Variación del escurrimiento superficial bajo lluvia simulada por efecto de la rugosidad superficial y aplicación de acondicionadores de suelo.**

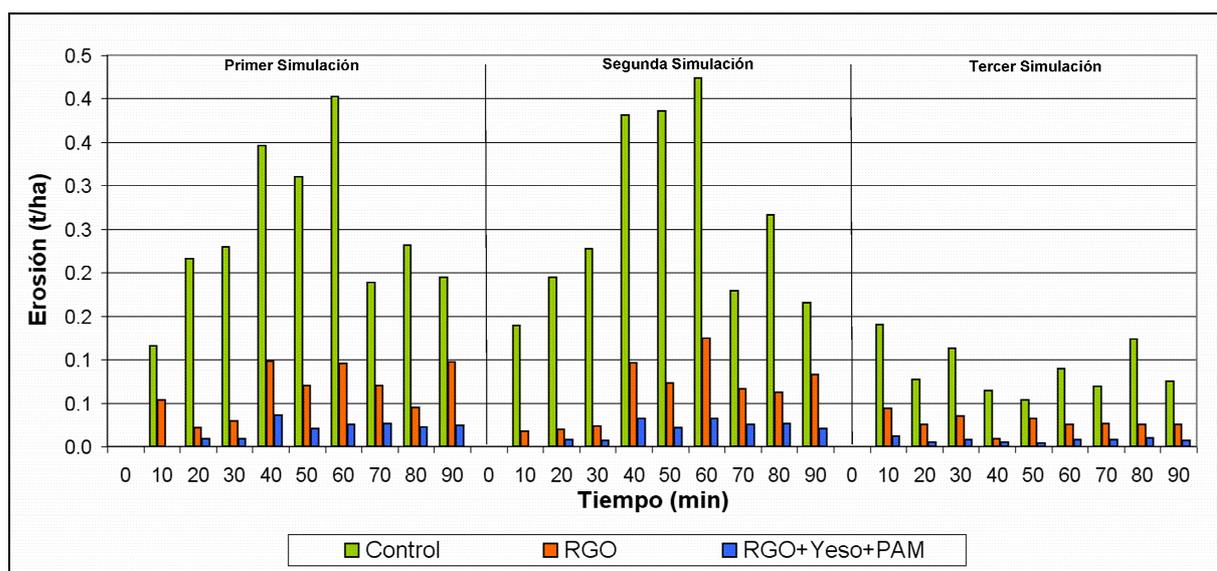
**Tabla 4.2. Comparación de medias de datos de escurrimiento bajo lluvia simulada.**

Tratamiento	Número de datos	Media	Homogeneidad
RGO+YESO+PAM	30	0.117	X
RGO	30	0.212	X
Control	30	0.593	X
Comparación		Diferencia	+/- Limites
Control - RGO		*0.381	0.135
Control - RGO+YESO+PAM		*0.476	0.135
RGO - RGO+YESO+PAM		0.095	0.135
*Diferencia estadísticamente significativa, LSD $\alpha=0.05$			

### 4.1.2 Erosión

Los resultados de pérdida de suelo (erosión) durante los tres eventos de simulación para cada uno de los tratamientos fueron congruentes con los de escurrimiento. La erosión acumulada de las tres simulaciones para el control fue de alrededor de 5.40 t/ha, mientras que para el caso de la RGO el valor correspondiente fue de 1.39 t/ha. En este caso, la disminución promedio equivalente fue del 74%, lo que indica la eficiencia del tratamiento para controlar la erosión hídrica. El tratamiento RGO+Yeso+PAM disminuyó aún más la erosión acumulada, a un valor final equivalente de 0.04 t/ha, lo que representa un 92% con respecto al control, y 70% con respecto al tratamiento de RGO por si misma.

Los valores obtenidos indican claramente que la configuración de la superficie del suelo disminuye significativamente el desprendimiento y el transporte de partículas de suelo, e incrementa el almacenamiento y la infiltración del agua de lluvia, tal como ha sido reportado por otros autores (Römken *et. al.*, 2001; Darboux *et. al.*, 2001).



**Figura 4.2. Variación de la erosión bajo lluvia simulada por efecto de la rugosidad superficial y aplicación de acondicionadores de suelo.**

Los resultados del análisis de varianza y comparación de medias se muestran en la Tabla 4.3. Aquí se observa, al igual que en el caso del escurrimiento, que existe una diferencia estadísticamente significativa entre el control y la RGO y entre el control y la RGO+Yeso+PAM, pero no entre la RGO y la RGO+Yeso+PAM.

Los resultados anteriores indicarían que no existe un efecto significativo de la aplicación de los acondicionadores en presencia de RGO, tanto en el escurrimiento como en la erosión. Sin embargo, esto se debe a que el análisis de varianza y comparación múltiple de medias incluye al control, cuyos valores puntuales son muy altos en comparación con los valores de los otros dos tratamientos, lo que estadísticamente limita la diferenciación entre estos dos tratamientos. Al realizar una prueba simple de *t-student* entre pares de tratamientos se obtuvo una diferencia estadísticamente significativa entre todos los tratamientos estudiados, lo que permite concluir que el orden de magnitud del escurrimiento y la erosión fue Control>RGO>RGO+Yeso+PAM.

**Tabla 4.3. Comparación múltiple de medias de datos de erosión bajo lluvia simulada de acuerdo a la prueba de Fisher.**

<b>Tratamiento</b>	<b>Número de datos</b>	<b>Media</b>	<b>Homogeneidad</b>
RGO+YESO+PAM	30	0.013	X
RGO	30	0.046	X
Control	30	0.180	X
<b>Comparación</b>		<b>Diferencia</b>	<b>+/- Limites</b>
Control - RGO		*0.133	0.0378
Control - RGO+YESO+PAM		*0.166	0.0378
RGO - RGO+YESO+PAM		0.032	0.0378
*Diferencia estadísticamente significativa, LSD $\alpha=0.05$			

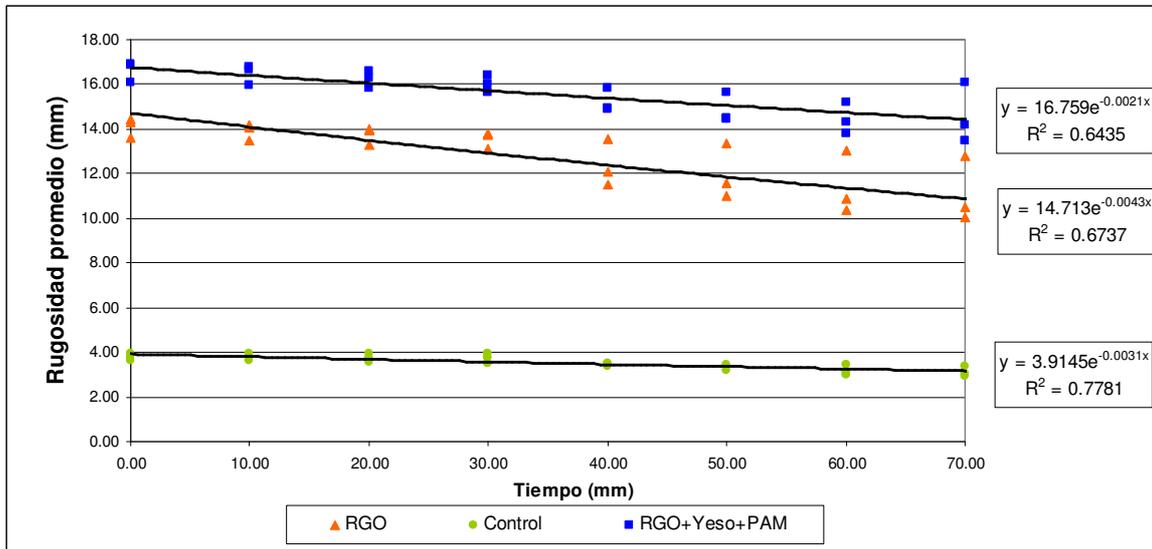
### **4.1.3 Rugosidad promedio (Ra)**

En la Figura 4.3 se observa la dinámica de la rugosidad para las tres simulaciones de lluvia realizadas en laboratorio. En el caso del tratamiento control, el valor promedio de la rugosidad fue de 3.422 mm con una tendencia a mantenerse estable con el tiempo. Esto debido a que este tratamiento inicia con un terreno relativamente plano que no se ve fuertemente influenciado por la lluvia intensidad de la lluvia, excepto al final de la tercera simulación, donde se inicia la formación de canalillos pero con superficie entre canalillos incipientes muy suavizada.

Para el caso del tratamiento de RGO, el valor de la rugosidad fue de 12.249 mm, valor superior al del tratamiento control, pero con una tendencia a disminuir como resultado del impacto de las gotas de lluvia y la acumulación de material desprendido en las depresiones. La rugosidad promedio en el tratamiento RGO+Yeso+PAM fue de 15.265 mm, valor superior tanto al control como al tratamiento RGO y refleja el efecto adicional de la aplicación de los acondicionadores en la superficie del suelo al proporcionar más resistencia contra la desintegración de los agregados del suelo. En este tratamiento se observó igualmente, una tendencia a la disminución de la rugosidad con el tiempo aunque de forma menos pronunciada que solo con RGO. De hecho, la pendiente de la línea de disminución de la rugosidad aleatoria promedio fue de 0.0043 en el tratamiento con RGO, disminuyendo a 0.0021, es decir, una disminución de casi un 50% en la velocidad de disminución de la rugosidad por efecto de la lluvia.

El análisis de varianza y la prueba de comparación múltiple de medias con el método mínima diferencia significativa (LSD) de Fisher a una confiabilidad del 95%, permitió determinar que existen diferencias

estadísticamente significativas entre los tres tratamientos para el parámetro de la rugosidad, tal como se puede observar en la Tabla 4.4.



**Figura 4.3. Variación de la rugosidad superficial bajo lluvia simulada por efecto de la rugosidad superficial y aplicación de acondicionadores de suelo.**

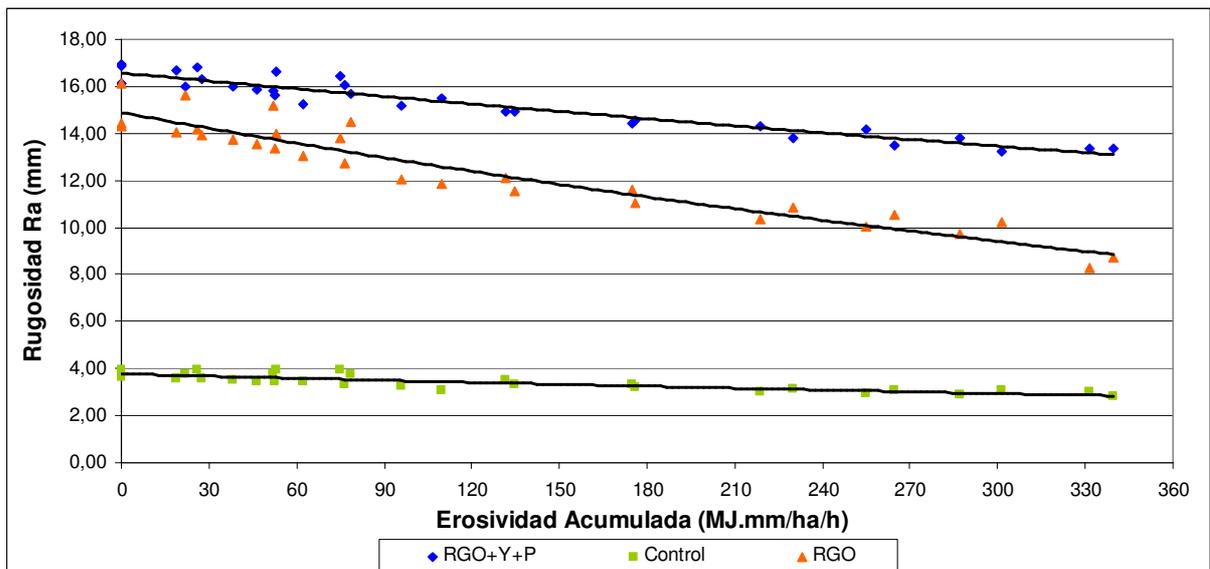
**Tabla 4.4. Comparación de medias de datos de rugosidad promedio (Ra).**

Tratamiento	Número de datos	Media	Homogeneidad
RGO+YESO+PAM	30	3,421	X
RGO	30	12,248	X
Control	30	15,267	X
Comparación		Diferencia	+/- Limites
Control - RGO		*-8,826	0,636
Control - RGO+YESO+PAM		*-11,844	0,636
RGO - RGO+YESO+PAM		*-3,015	0,636
*Diferencia estadísticamente significativa, LSD $\alpha=0.05$			

#### 4.1.4 Relación de la dinámica de la rugosidad y la erosividad acumulada

En la Figura 4.4 se presenta la evolución de la rugosidad de la superficie del suelo con la erosividad acumulada de la lluvia. Puede observarse que tanto el tratamiento de RGO como el de RGO+Yeso+PAM iniciaron con valores de RGO mayores a los del control, dada la reconfiguración inicial al imprimir la superficie con el dispositivo de creación de RGO.

Los modelos exponenciales decrecientes se ajustaron adecuadamente al comportamiento de los datos. En general, la rugosidad tuvo una tendencia a la disminuir con la erosividad aplicada para los tres tratamientos. La tasa de decaimiento fue diferente en todos los casos, lo que implica un efecto significativo de los tratamientos.



**Figura 4.4. Relación entre rugosidad promedio (Ra) y la erosividad de la lluvia (R).**

En cualquier caso, estos resultados comprueban de inicio, que tanto el almacenamiento de agua en las depresiones formadas por la RGO como la aplicación del yeso y la poliacrilamida disminuyen el impacto negativo de las gotas de lluvia en la disgregación de los

agregados del suelo (Planchon *et. al.*, 2001). El modelo matemático de ajuste de la relación entre las dos variables tiene la siguiente estructura:

$$Ra = Ro e^{-AR} \quad (4.1)$$

En donde:

- Ra Rugosidad.
- Ro Rugosidad inicial.
- A Constante de decaimiento.
- R Erosividad Acumulada.

En la tabla 4.5, se pueden observar los valores de los parámetros de la ecuación y el coeficiente de determinación, que indica el ajuste de los datos observados al modelo propuesto.

**Tabla 4.5. Ecuación de decrecimiento de rugosidad por tratamiento.**

<b>Tratamiento</b>	<b>Ecuación</b>
Control	$Ra = 3.768 Ro e^{-0.00083 R}$ $R^2=0.75$
RGO	$Ra = 14.361 Ro e^{-0.00139 R}$ $R^2=0.94$
RGO+Yeso+PAM	$Ra = 16.574 Ro e^{-0.00069 R}$ $R^2=0.93$

En general se puede mencionar que dado el efecto de la reconfiguración ordenada de la rugosidad del suelo, el efecto de la energía de impacto de la lluvia fue disipada notablemente por el agua acumulada en las depresiones formadas por la RGO. Adicionalmente, la velocidad de flujo sobre la superficie disminuyó considerablemente, decreciendo la magnitud del escurrimiento y la erosión. La aplicación superficial de yeso y poliacrilamida mantuvo la RGO creada por un

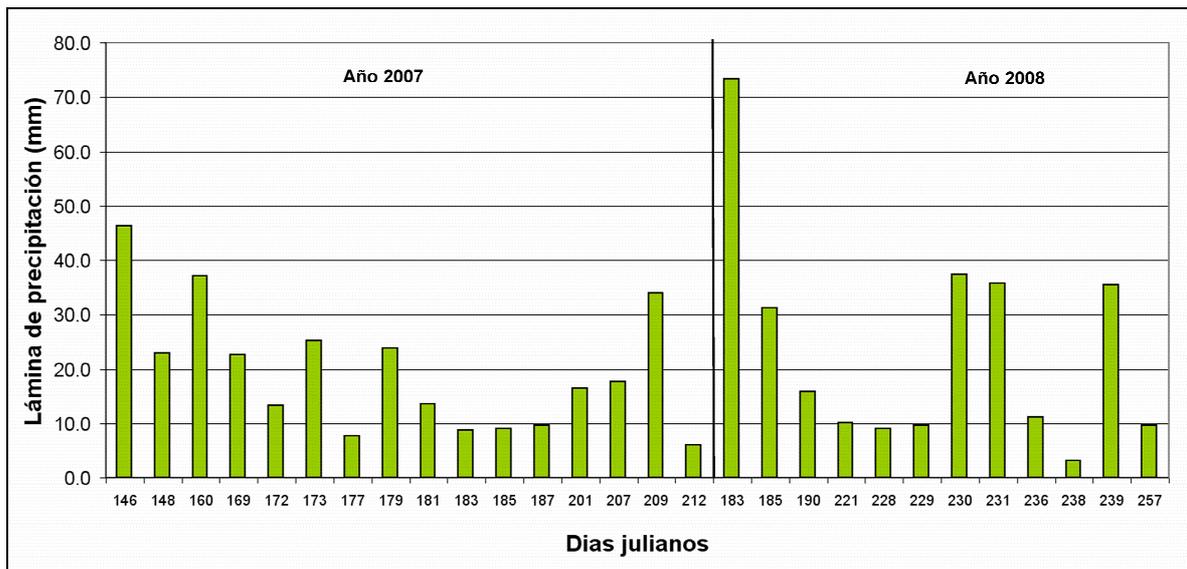
tiempo mayor, con un valor final 40% superior comparado al tratamiento donde solo se uso RGO.

## **4.2 Evaluación del efecto de la rugosidad geoméricamente ordenada (rgo) en la erosión hídrica y el escurrimiento bajo los efectos de la lluvia natural**

### **4.2.1 Precipitación**

Durante los periodos de Junio a Septiembre del 2007 y 2008 se monitorearon un total de 28 eventos cuya distribución se presenta en la Figura 4.5. Los eventos mostraron intensidades medias que variaron desde 1.07 mm/h hasta eventos con intensidades de 25.2 mm/h. La duración de los mismos estuvo en el rango de 0.75 hasta alrededor de 27.00 h y la lámina total de escurrimiento varió entre 3.20 mm y 73.41 mm. Esta variación de láminas, intensidades y duraciones entre los eventos ayudaron a validar los tratamientos propuestos bajo diferentes condiciones de precipitación, lo que da validez amplia a los resultados obtenidos. Durante la temporada de lluvias del 2007 se monitorearon un total de 16 eventos con una lámina total acumulada de de alrededor 315 mm, registrados entre el 26 de mayo y el 31 de julio. Los eventos del año 2007 mostraron intensidades medias entre 25.5 mm/h y 1.17 mm/h, con láminas entre 46.3 mm y 6.10, y duraciones entre 0.75 h y 27 h.

Durante la temporada de lluvias del año 2008 se monitorearon 12 eventos con una lámina total acumulada de alrededor de 219 mm. Los eventos se registraron entre el 1 de julio y el 13 de septiembre. Las intensidades medias registradas variaron desde 1.07 mm/h hasta 20.2 mm/h. La duración de los mismos estuvo en el rango de 0.83 h hasta 14.92 h, y las láminas totales de escurrimiento entre 3.20 mm y 73.41 mm.



**Figura 4.5. Distribución de láminas de precipitación en los eventos monitoreados.**

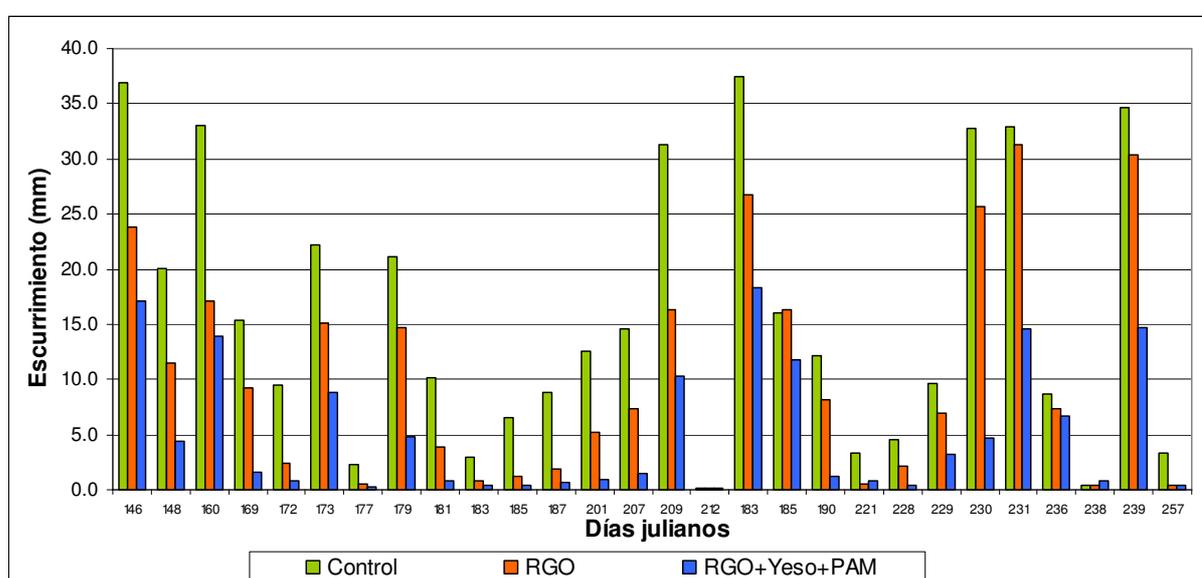
La erosividad acumulada para el total de los eventos monitoreados fue de 1815.28 MJ.mm/ha.h, de la cual 967.37 MJ.mm/ha.h corresponde al año 2007 y 847.91 al 2008. En los eventos monitoreados en el 2007 se encontró que la erosividad máxima por evento fue de 175.7 MJ.mm/ha.h y la mínima de 7.45 MJ.mm/ha.h; mientras que para el 2008 la erosividad correspondiente fue de 161.44 MJ.mm/ha.h y 2.95 MJ.mm/ha.h.

#### **4.2.2 Esguerrimiento**

Los valores de esguerrimiento superficial para los tres tratamientos en los 28 eventos registrados se muestran en la Figura 4.6. De manera general, el esguerrimiento acumulado para los tratamientos control, RGO y RGO+Yeso+PAM fueron de 443.43 mm, 287.56 mm y 144.31 mm, respectivamente. El tratamiento RGO disminuyó el esguerrimiento promedio en un 49% con respecto al tratamiento control. Esta disminución fue aún mayor para el tratamiento RGO+Yeso+PAM, con un valor de 75%. La disminución del esguerrimiento superficial

comprueba que la configuración de la superficie del suelo mediante una RGO es una alternativa para la regulación de este proceso hidrológico.

Este efecto se magnifica si se asocia con la aplicación superficial de yeso y poliacrilamida aniónica, con lo que se incrementa significativamente la infiltración del agua de lluvia (Bresson y Boiffin, 1999; Vázquez y González, 2003), comprobando una vez más su importancia como regulador de la erosión hídrica (Helming *et. al.*, 1998).



**Figura 4.6. Variación del escurrimiento superficial bajo lluvia natural por efecto de la rugosidad superficial y aplicación de acondicionadores de suelo.**

La comprobación estadística del efecto de los tratamientos se hizo mediante el análisis de varianza y la prueba de comparación múltiple de medias de mínima diferencia significativa de Fisher con un nivel de confiabilidad del 95%. Los resultados de la Tabla 4.6 indican que existe una diferencia estadísticamente significativa entre el control y la RGO, y la RGO+Yeso+PAM, pero no entre estas dos últimas. Los resultados anteriores indicarían que no existe un efecto significativo de la aplicación de los acondicionadores en presencia de RGO, tanto en el escurrimiento

como en la erosión. Sin embargo, esto se debe a que el análisis de varianza y comparación de medias involucra al control, con valores absolutos y relativos muy por encima de los tratamientos, lo que disminuye la diferencia relativa entre ellos. Al realizar una prueba de comparación simple de t-student, se obtuvo una diferencia significativa entre la RGO y la RGO+Yeso+PAM, lo que es más congruente con la realidad.

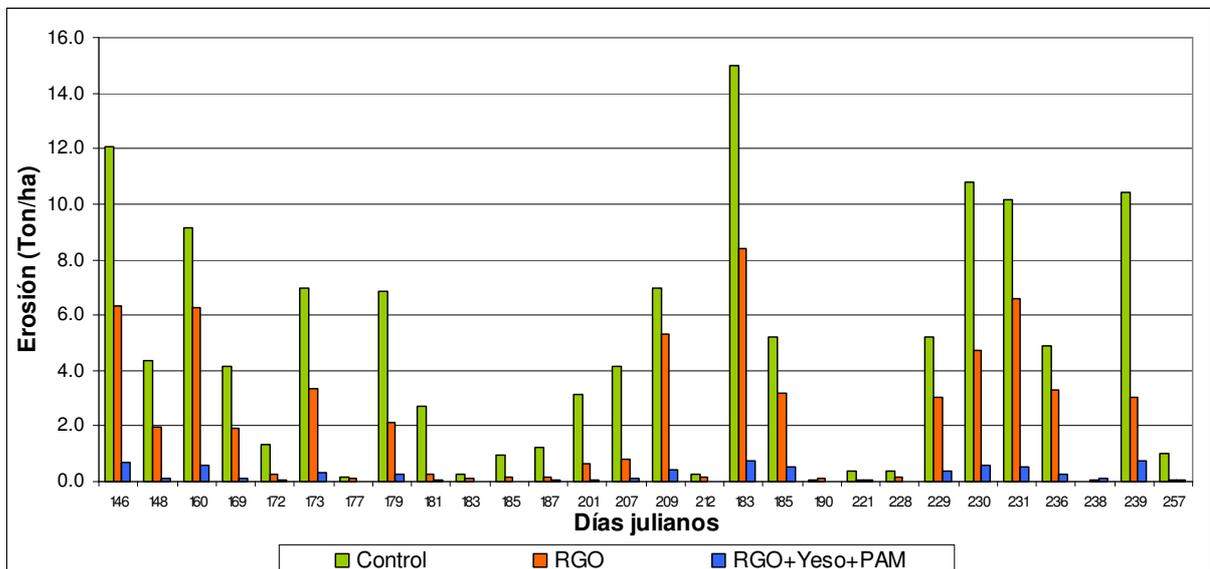
**Tabla 4.6. Comparación de medias de datos de escurrimientos bajo lluvias naturales.**

<b>Tratamiento</b>	<b>Número de datos</b>	<b>Media</b>	<b>Homogeneidad</b>
RGO+YESO+PAM	28	5.154	X
RGO	28	10.270	X
Control	28	15.154	X
<b>Comparación</b>		<b>Diferencia</b>	<b>+/- Limites</b>
Control - RGO		*5.566	5.180
Control - RGO+YESO+PAM		*10.682	5.180
RGO - RGO+YESO+PAM		5.116	5.180
*Diferencia estadísticamente significativa, LSD $\alpha=0.05$			

### 4.2.3 Erosión

La erosión por evento de precipitación, se muestra en la figura 4.7. La erosión acumulada para la parcela control alcanzó un total de 128.25 t/ha. El tratamiento RGO produjo 62.41 t/ha, lo que significó una disminución promedio del 60% con respecto al tratamiento control. Esto demuestra que la RGO es por sí sola una técnica eficiente para controlar la erosión hídrica. Sin embargo, el tratamiento con RGO+Yeso+PAM fue aún más efectivo para el control de la erosión con un valor acumulado de solo 6.73 t/ha, lo que representa una disminución promedio del 95% con respecto al tratamiento control y 89% con respecto al tratamiento de RGO.

Los valores de erosión obtenidos indican que tanto la RGO como la RGO+Yeso+PAM son más efectivas en el control de la erosión que en la reducción del escurrimiento. Esto puede deberse a que aun en condiciones saturadas de suelo, la RGO reduce la velocidad del flujo y aumenta la resistencia al desprendimiento del suelo por efecto de la lluvia y el escurrimiento, lo que resulta en menores tasas de erosión (Römken *et. al.*, 2001; Darboux *et. al.*, 2001). Esta diferencia se hace mayor con la aplicación de los acondicionadores propuestos en este estudio (Bjerneberg y Aase, 2000; Cochrane *et. al.*, 2005; Leib, 2005).



**Figura 4.7. Variación de la erosión bajo lluvia natural por efecto de la rugosidad superficial y aplicación de acondicionadores de suelo.**

El análisis de varianza y comparación de medias demuestra que existe diferencia estadísticamente significativa entre todos los tratamientos, de acuerdo a la prueba de comparación múltiple de medias de mínima diferencia significativa de Fisher con un nivel de confiabilidad del 95% (Tabla 4.7). Así, la erosión media en ton/ha fue mayor para el tratamiento RGO+Yeso+PAM, seguida del tratamiento RGO y finalmente el Control. Preliminarmente se puede mencionar que

la RGO reduce significativamente la tasa de erosión, y que este efecto se magnifica cuando se adiciona yeso y poliacrilamida superficialmente.

**Tabla 4.7. Comparación de medias de datos de erosión bajo lluvias naturales.**

<b>Tratamiento</b>	<b>Número de datos</b>	<b>Media</b>	<b>Homogeneidad</b>
RGO+Y+P	28	0.240	X
RGO	28	2.228	X
Control	28	4.580	X
<b>Comparación</b>		<b>Diferencia</b>	<b>+/- Limites</b>
Control - RGO		*2.351	1.522
Control - RGO+YESO+PAM		*4.339	1.522
RGO - RGO+YESO+PAM		*1.988	1.522
*Diferencia estadísticamente significativa, LSD $\alpha=0.05$			

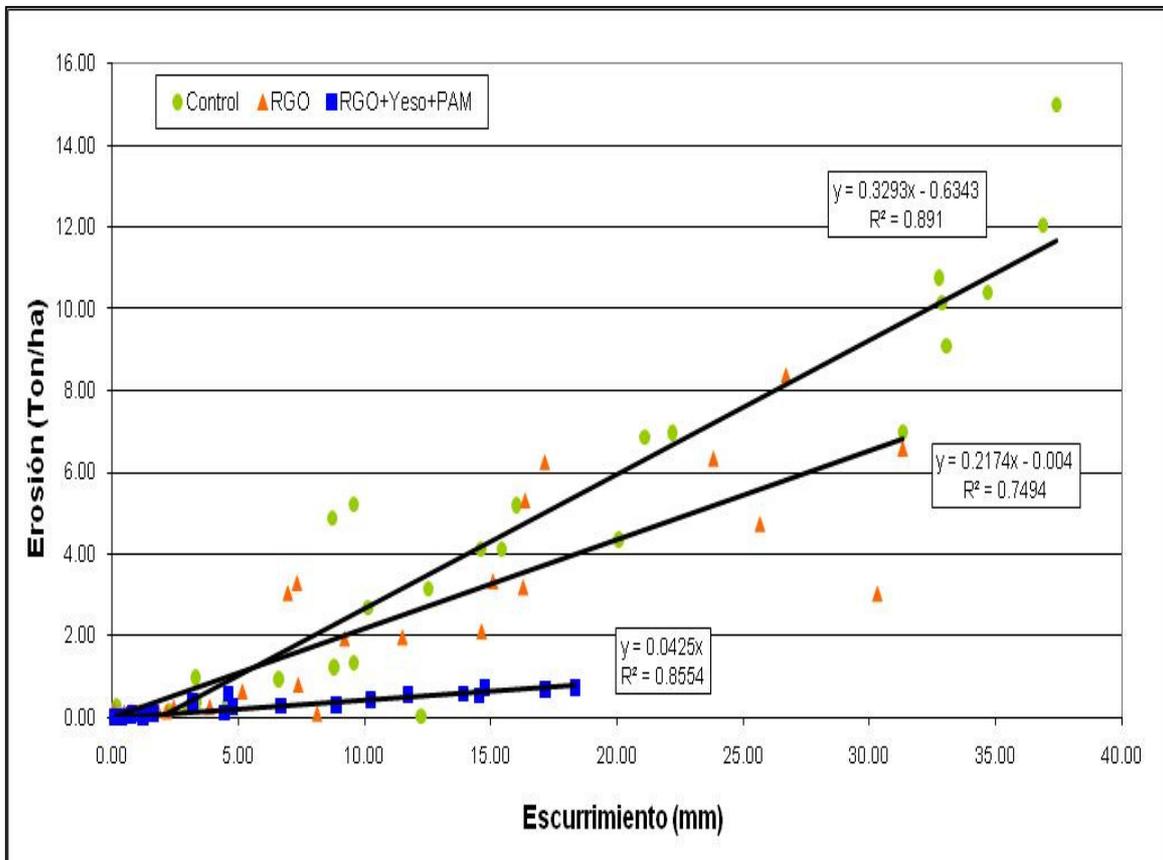
#### **4.2.4 Relación de la erosión hídrica y el escurrimiento superficial**

Las relación entre la tasa de erosión y el escurrimiento superficial se muestran en la Figura 4.8 con modelos de regresión lineal ajustados a los datos de los dos años de estudio. Es importante resaltar que se realizó una prueba inicial para obtener el mejor modelo de ajuste. Aunque se conoce que la relación entre estas dos variables es no lineal (Rouhipour *et. al.*, 2006) en este caso no existió una diferencia significativa en el valor de los coeficientes de determinación cuando se utilizaron modelos lineales o no lineales, por lo que se decidió para fines comparativos presentar las ecuaciones de la recta. El comportamiento lineal de los datos puede deberse al rango de de valores del escurrimiento superficial, que no se considera alto.

En ese sentido, se puede mencionar que la pendiente de la recta indicaría la cantidad de suelo erosionado en toneladas por hectárea por milímetro de escurrimiento generado. Así, para el caso de la parcela

control, el valor obtenido fue de aproximadamente 0.329 ton/ha.mm de escurrimiento. Este valor disminuyó para el tratamiento con RGO a 0.217 ton/ha.mm de escurrimiento. El menor valor de la pendiente de la recta fue para el tratamiento de RGO+Yeso+PAM (0.042 ton/ha.mm de escurrimiento), lo que indica el beneficio de la aplicación de los dos acondicionadores de suelo para la estabilización de la RGO y la disminución del escurrimiento superficial (Bjorneberg y Aase, 2000; Cochrane *et. al.*, 2005; Leib, 2005).

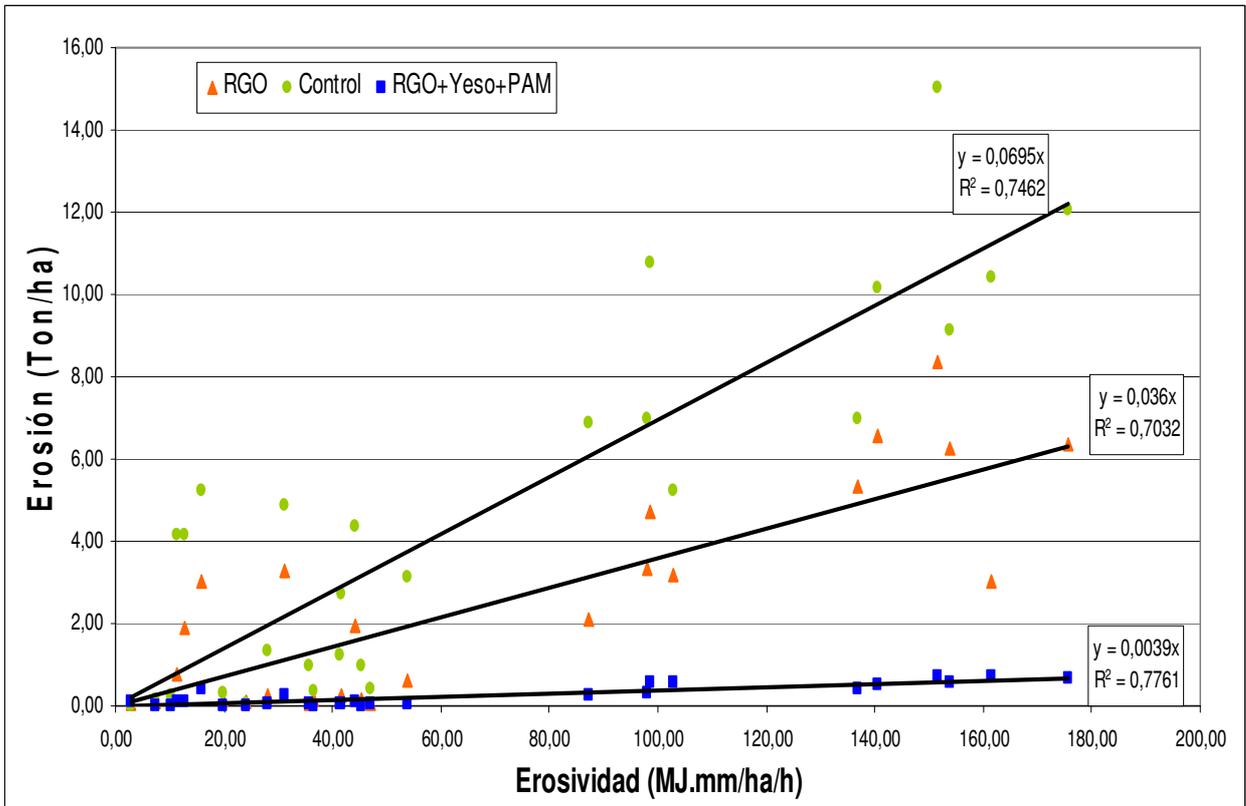
El intercepto al origen de las rectas de regresión son un indicativo del inicio del desprendimiento del suelo, lo que indica que la erosión no ocurre de manera instantánea, sino que es necesario romper la resistencia del suelo mediante un esfuerzo critico de corte para que el movimiento de las partículas del suelo pueda ocurrir (Nearing *et. al.*, 1989).



**Figura 4.8. Relación de la erosión hídrica y el escurrimiento superficial bajo lluvia natural.**

#### **4.2.5 Relación de la erosión hídrica y la erosividad**

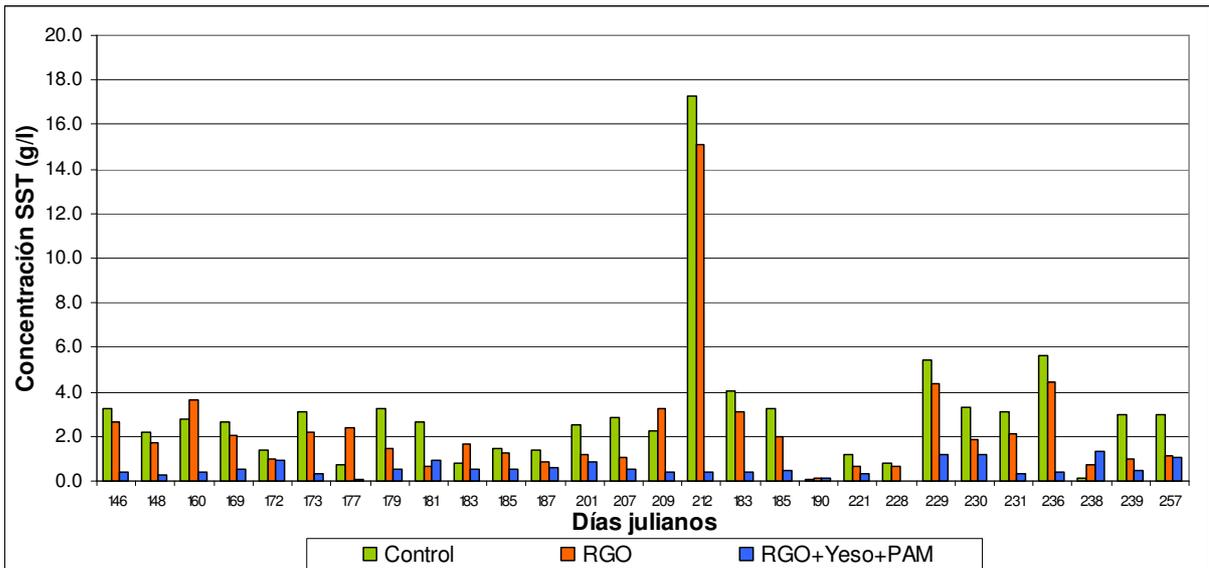
La relación entre la erosión del suelo y la erosividad de la lluvia para los diferentes tratamientos estudiados se muestra en la Figura 4.9. Los ajustes de las rectas de regresión se consideran adecuados (Neter *et. al.*, 1973). El valor de la pendiente de la recta en este caso es un indicador de la cantidad de suelo erosionado por cada unidad de índice de erosividad. Para el caso de la parcela control, el valor obtenido fue de aproximadamente 0.069 ton/ha por unidad de R. El valor disminuyó de forma significativa a casi la mitad para el tratamiento con RGO (0.036 ton/ha por unidad de R), mientras que para la parcela de RGO+Yeso+PAM el valor correspondiente fue muy cercano a cero (0.003 ton/ha por unidad de R), lo cual indica una tasa muy baja de desprendimiento cuando se aplicaron yeso y poliacrilamida a la RGO, resultado de un aumento en la resistencia del suelo al impacto de las gotas de lluvia y el escurrimiento, con lo que también potencialmente se reduce el encostramiento y sellamiento superficial (Sojka y Surapaneni, 2000; Sivapalan, 2005).



**Figura 4.9. Relación de la erosión hídrica y la erosividad bajo lluvia natural.**

#### 4.2.6 Calidad del Agua de Escurrimiento

En la Figura 4.12, se pueden observar los valores de la concentración de sólidos suspendidos totales para cada evento de precipitación en cada tratamiento. En general, el tratamiento RGO disminuyó en un 23% la concentración de sólidos suspendidos totales con respecto al tratamiento control, mientras que la adición de yeso y PAM mejoró esta disminución al reducir en un 92% el mismo parámetro.



**Figura 4.12. Variación de la concentración de sólidos suspendidos totales de los escurrimientos.**

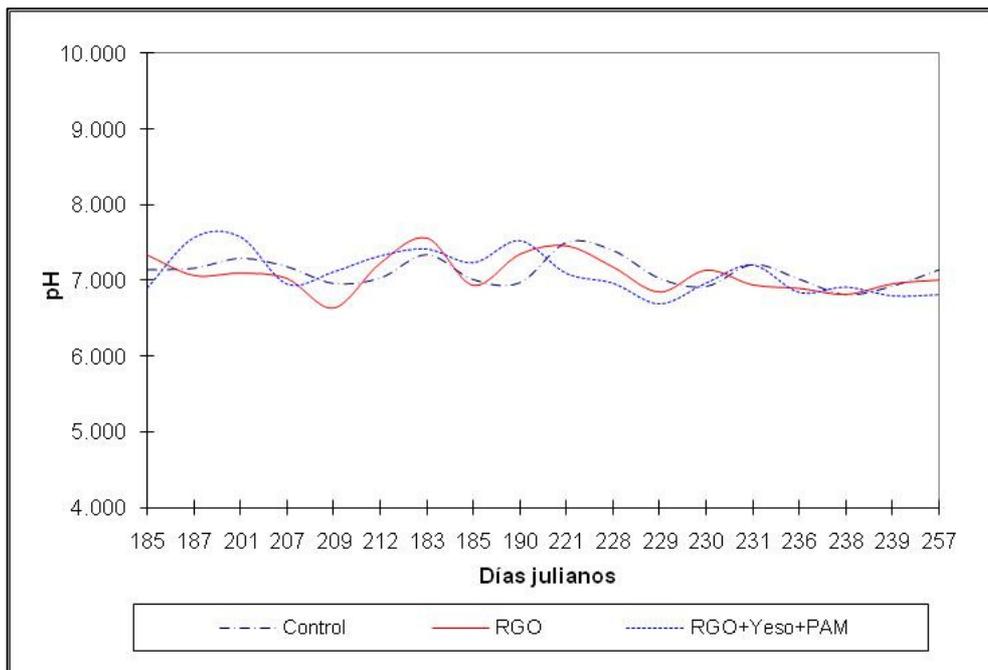
El análisis de varianza y la prueba de comparación de medias demuestra que existe diferencia estadísticamente significativa en la RGO+Yeso+PAM con la parcela RGO y la parcela control, pero no entre estos dos últimos tratamientos. De acuerdo al análisis realizado con el método de comparación múltiple de medias de Fisher a un nivel de confianza del 95% (Tabla 4.8), lo que significa una contribución significativa del Yeso y la PAM a la estabilización de la estructura del suelo y el proceso desprendimiento y arrastre de partículas y sedimentos, lo que aumenta la calidad del agua de escurrimiento.

**Tabla 4.8. Comparación de medias de datos de concentraciones de sólidos suspendidos totales bajo lluvia natural.**

<b>Tratamiento</b>	<b>Número de datos</b>	<b>Media</b>	<b>Homogeneidad</b>
RGO+YESO+PAM	28	0,554	X
RGO	28	2,295	X
Control	28	2,981	X
<b>Comparación</b>		<b>Diferencia</b>	<b>+/- Limites</b>
Control - RGO		0,686	1,280
Control - RGO+YESO+PAM		*2,427	1,280
RGO - RGO+YESO+PAM		*1,740	1,280
*Diferencia estadísticamente significativa, LSD $\alpha=0.05$			

El potencial de hidrogeno o pH es una propiedad importante del agua y del suelo y se puede considerar como una indicador de la posible afectación de los acondicionadores a la calidad del agua. Las mediciones efectuadas demuestran que aunque en todos los tratamientos se encontró una variación de los datos, no existe una aparente afectación del pH del agua de escurrimiento, y que tanto el yeso como la PAM no afectan de manera significativa este parámetro. De hecho, de acuerdo a la prueba de comparación múltiple de medias de Fisher a un nivel de confianza del 95%, no existieron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, Sin embargo, esto se debe a que el análisis de varianza y comparación de medias involucra al control. Al realizar una prueba de comparación simple de t-student, se obtuvo que si existe una diferencia significativa entre la RGO y la RGO+Yeso+PAM (Figura 4.13 y Tabla 4.9). Los pequeños picos mostrados en la gráfica están asociados a la acumulación de sales en la superficie durante periodos secos y su posterior lavado por el escurrimiento, lo que aumenta ligeramente el pH pero más significativamente la conductividad eléctrica, que esta más relacionada con el contenido de sales (Sivapalan, 2005).

De hecho, en lo que respecta a la conductividad eléctrica del agua de escurrimiento, tal como se puede observar en la Figura 4.14, el tratamiento RGO+Yeso+PAM mostró los valores más altos en comparación con los otros dos tratamientos. El valor promedio para este tratamiento fue de  $165 \mu S$ , mientras que el correspondiente para la RGO y el Control fueron de  $68 \mu S$  y  $57 \mu S$ , respectivamente.



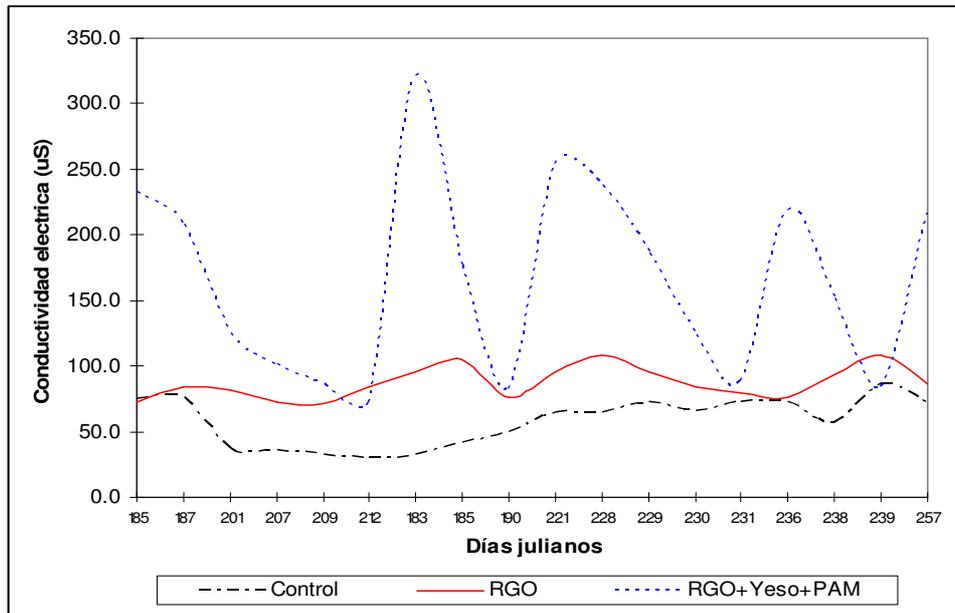
**Figura 4.13. Variación del pH de escurrimiento bajo lluvia natural por efecto de la rugosidad superficial y aplicación de acondicionadores de suelo.**

**Tabla 4.9. Comparación de medias de datos de pH bajo lluvia natural.**

Tratamiento	Número de datos	Media	Homogeneidad
RGO+YESO+PAM	18	7.101	X
RGO	18	7.084	X
Control	18	7.122	X
Comparación		Diferencia	+/- Limites
Control - RGO		0.037	0.158
Control - RGO+YESO+PAM		0.020	0.158
RGO - RGO+YESO+PAM		-0.016	0.158
*Diferencia estadísticamente significativa, LSD $\alpha=0.05$			

Este incremento se debe principalmente a la aplicación de Yeso, ya que este material es una fuente de electrolitos a la solución del suelo. La acumulación del yeso en forma de calcio en la superficie del suelo durante los periodos de evaporación del agua en el suelo y la posterior ocurrencia de lluvia y escurrimiento ocasionan la presencia altas concentraciones de sales en el escurrimiento, indicados como picos en la Figura 4.14. En general no hubo diferencia significativa entre el control y la RGO, ver tabla 4.10, pero si entre el tratamiento RGO+Yeso+PAM y esos dos tratamientos, sin embargo, esto se debe a que el análisis de varianza y comparación de medias se involucraron los valores obtenidos en el control, lo que disminuye la diferencia relativa entre ellos. Al realizar una prueba de comparación simple de t-student, se obtuvo una diferencia significativa entre la RGO y la RGO+Yeso+PAM.

El valor alto de la conductividad eléctrica en este caso no es detrimental para el suelo ni los cuerpos y corrientes de agua, ya que la fuente de esta propiedad es el calcio y no cationes de efecto negativo en los sistemas suelos y acuáticos como el sodio, potasio y magnesio (Douglas Mata R. y Ildfonso Pla Sentis, 1992).



**Figura 4.14. Variación de la conductividad eléctrica de escurrimiento bajo lluvia natural por efecto de la rugosidad superficial y aplicación de acondicionadores de suelo.**

**Tabla 4.10. Comparación de medias de datos de conductividad eléctrica bajo lluvia natural.**

Tratamiento	Número de datos	Media	Homogeneidad
RGO+YESO+PAM	18	165.028	X
RGO	18	68.166	X
Control	18	57.527	X
Comparación		Diferencia	+/- Límites
Control - RGO		-29.638	29.619
Control - RGO+YESO+PAM		-107.561	29.619
RGO - RGO+YESO+PAM		-35.861	29.619
*Diferencia estadísticamente significativa, LSD $\alpha=0.05$			

Puede preliminarmente concluirse que el efecto combinado de la Rugosidad Geométricamente Ordenada y del Yeso y la Poliacrilamida aniónica en la superficie de los suelos aumenta la calidad del agua al disminuir la concentración de sólidos suspendidos y aumentar la conductividad eléctrica debido a la presencia de calcio en el agua de escurrimiento.

## **V. CONCLUSIONES**

La aplicación del método alternativo para la medición de la rugosidad a partir de una reconstrucción bidimensional de fotografías digitales demostró ser útil y práctico de aplicar para medir la rugosidad promedio ( $R_a$ ).

La creación de rugosidad geoméricamente ordenada en la superficie del suelo disminuyó el escurrimiento total en un 56.5% promedio en comparación con una superficie de suelo plana. Esta disminución aumentó a un valor promedio de 77.5% cuando la rugosidad geoméricamente ordenada fue combinada con la aplicación de yeso y poliacrilamida en la superficie del suelo.

En el caso de la erosión del suelo, tomando como referencia los valores generados en la parcela control, la erosión fue disminuida en un 67% promedio para la RGO y aumentó significativamente hasta un 93% promedio con la aplicación de yeso y poliacrilamida.

La creación de una rugosidad geoméricamente ordenada en la superficie del suelo disminuye significativamente el escurrimiento superficial y la erosión, aumentando de esta manera el volumen de agua de lluvia para los procesos de infiltración y evapotranspiración del suelo. Los efectos son aún más significativos si se adiciona Yeso y poliacrilamida en la superficie del suelo como resultado de una disminución del encostramiento y un aumento de la resistencia del suelo a las fuerzas erosivas de la lluvia.

La erosión hídrica no sólo depende de factores tradicionalmente mencionados como la cobertura, la pendiente, el clima y el tipo de suelo, sino que también depende de otros factores como es el caso de la

configuración de la superficie del suelo también llamada rugosidad superficial del suelo. De esta manera modificando la rugosidad se puede modificar la erosión hídrica, tal es el ejemplo de esta investigación en donde por medio de la creación de la rugosidad geoméricamente ordenada se puede controlar la erosión y el escurrimiento superficial, y si se combina esta practica con acondicionadores de suelo como el Yeso y la poliacrilamida el control de la erosión hídrica es más eficiente.

La dinámica de la rugosidad geoméricamente ordenada tiene un decrecimiento exponencial con respecto a la capacidad erosiva de la lluvia (erosividad). Este decrecimiento se puede retardar con la ayuda de la aplicación de Yeso y poliacrilamida, ya que gracias a estos acondicionadores se disminuye el encostramiento y se aumenta la resistencia del suelo a las fuerzas erosivas de la lluvia.

Los resultados obtenidas de la evaluación de la dinámica de la rugosidad, podrían mejorarse si se llevara a cabo la medición de la misma en campos experimentales con precipitaciones reales, ya que otro tipo de fenómenos como la radiación solar y el viento pueden llegar a afectar este parámetro.

## **VI. REFERENCIAS**

Bjorneberg, D. L. y Aase, J. K. 2000. Multiple polyacrylamide applications for controlling sprinkler irrigation runoff and erosion. *Asae american society of agricultural*. 16:501-504.

Bresson, L. M. y Boiffin, J. 1999. Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field. *Geoderma*. 7:301-325.

Cochrane B. H., Reichert J. M., Eltz F.L. y Norton L. D. 2005. Controlling soil erosion and runoff with polyacrilamide and phosphogypsum on subtropical soil. *ASAE*. 48:149-154.

Darboux F., Davy Ph., Gascuel-Oudou C y Huang C. 2001. Evolution of soil surface roughness and flowpath connectivity in overland flow experiments. *Elsevier*. 46:125-139.

Darboux F. y Huang C. 2005. Does soil surface roughness increase or decrease water and particle transfers?. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:748-756.

Douglas Mata R. and Ildelfonso Pla Sentis, 1992. Caracterización de los problemas de salinidad de suelos y aguas en cuatro zonas de la cuenca del lago de Maracaibo. *Agronomía Tropical*. Vol. 42(1-2). 85-96.

Fao-Unesco. 1987. *World Soil Classification*.

Fernández R. 1997. Características físicas y mecánicas de suelos de cultivo. Tesis doctoral. Universidade da Coruña. 283pp.

Foster G.R. 1982. Modeling the erosion process. Workshop on estimating erosion and sediment yield on rangelands. Tucson, Arizona. Marzo 1981. 297-380pp.

Foster G.R. y Lane L. J. 1983. Erosion by concentrated flow in farm fields. Symp. to the honor D.H. Simons. Colorado State University. Ft. Collins. 28-30pp.

Foster G.R., Young R.A., Romkens M.J.M. y Onstad C.A. 1985. Processes of soil erosion by water. Soil erosion and crop productivity. ISBN 08-911-80877, 137-162pp.

George R., Srinivas K.R. y Flack Tom. 2001. Flexible optical 3D non-contact coordinate measurement. Society of Automotive Engineers. 3B:122-126.

Gómez J.A. y Nearing M.A. 2005. Runoff and sediment losses from rough and smooth soil surfaces in a laboratory experiment. [Catena](#). 59: 253-266.

Graf W.H. 1971. Hydraulics of sediments transport. McGraw-Hill. Tercer edición. New York. 325pp.

Helming K., Roth CH., Wolf R. y Diestel H. 1998. Characterization of rainfall microrelief interactions with runoff using parameters derived from digital elevation models (DEMs). *Soil Technology*. 6:273-286.

Hinojosa Moisés y Reyes Martín. 2001. La rugosidad de las superficies: Topometría. FIME-UANL, Facultad Ingenierías. San Nicolas de los Garza, N.L. Vol. 5. 27-33.

INIFAP. Instituto nacional de investigaciones forestales agrícolas y pecuarias.

Lal R. 1994. Soil Erosion. Soil and water conservation society. Segunda edición. Estados Unidos de Norteamérica. 340pp.

Le Bissonnais. 1988. Analyse des mécanismes de désagregation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies. Thèse de doctorat. Université d'Orléans. 255 pp.

Leib B. G., Redulla C. A., Stevens R. G., Matthews G. R., Strausz D. A. 2005. Erosion control practices integrated with polyacrylamide to reduce sediment loss in furrow irrigation. Applied engineering in agriculture. 21:595–603.

Linsley Jr. R. K., Kohler M. A. y Paulus, J. L. H. 1984. Hidrología para ingenieros. Mc Graw-Hill. Segunda edición. Stanford. 50-53pp.

Meyer, L. D. 1981. How intensity effects interrill erosion. American Society Agricultural Engineering. 25:1472-1475.

Nearing M.A., Page D.I., Simanton J.R. and Lane L.J., 1989. Determining erodibility parameters from rangeland field data for a process-based erosion model. Asae. Vol. 32 (3). 919-924.

Neter, Wasserman and Whitmore, 1973. Fundamentos de Estadística para Negocios y Economía. CECSA. Tercer edición. Washington. 1-517.

Oelze M. L., Sabatier J. M. y Raspert R. 2003. Roughness measurements of soil surfaces by acoustic backscatter. Soil Sci. Soc. 67: 241–250.

Palma A. y Sánchez A. 2005. La fotografía aérea en la planeación y manejo de los recursos naturales. Universidad Autónoma de Chapingo. Primera edición. México. 335pp.

Pardini G. y Gallart F. 2004. A combination of laser technology and fractals to analyse soil surface roughness. *European Journal of Soil Science*. 55:751–762.

Planchon O., Esteves M., Silvera N. y Lapetite J.M. 2001. Microrelief induced by tillage: measurement and modelling of Surface Storage Capacity. *Elsevier*. 46:141-157.

Rivera F., Gutiérrez A., Val R., Mejía R., Sánchez P.A., Aparicio J. y Díaz L.L. 2005. La medición de sedimentos en México. IMTA-UJAT. México. 318pp.

Rouhipour H., Ghadiri H. and C.W. Rose, 2006. Investigation of the interaction between flow-driven and rainfall-driven erosion processes. *Australian journal of soil research*. Vol. 44. 503-514.

Römkens M.J.M., Helming K., Prasad S.N. 2001. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes. *Elsevier*. 46:103-123.

Salcedo J.L., Ventura E. y Luna F. 2005. Método alternativo para medir la pérdida de suelo en parcelas de erosión-escurrimiento tipo USLE. II congreso internacional de ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro.

Samouelian A., Richard G., Cousin I., Guerin R., Bruand A. y Tabbagh A. 2004. Three-dimensional crack monitoring by electrical resistivity measurement. *European Journal of Soil Science*. 55:751–762.

Semarnat. 2005. Informe de la situación del medio ambiente en México. Secretaria de medio ambiente y recursos naturales. México. 380pp.

Sivapalan S. 2005. Effect of gypsum and polyacrylamides on water turbidity and infiltration in a sodic soil. Australian Journal of Soil Research. 43:723-733.

Sojka R.E. y Surapaneni A. 2000. Potential use of polyacrylamide (PAM) in Australian agriculture to improve off and on-site environmental impacts and infiltration management. Land & Water Resources Research and Development Corporation. 39:1-37.

Taboada Castro. 2001. Morfología de las superficies cultivadas en relación con la infiltración, la formación del excedente de agua y la erosión. Tesis doctoral. Universidade da Coruña. 487pp.

Torres S. V. 2007. Efecto de la aplicación superficial del yeso y poliacrilamida en la erosión hídrica en un sistema de labranza en franjas. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. 90pp.

Toy, T.J., Foster, G.R., y Renard, K. G. 2002. Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement and Control. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA. 338 pp.

Vázquez E. 2002. Influencia de la precipitación y el laboreo en la rugosidad del suelo y la retención de agua en micro depresiones. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad de La Coruña. 430 pp.

Vázquez E. y González E. 2003. Degradación de la superficie del suelo y erosión hídrica en el año agrícola 2002-2003. IV Congreso sobre erosión hídrica. Organizado por la Universidad de la Coruña. 13-15 de noviembre de 2003. Coruña, España.

Ventura E. Jr., Domínguez M.A., López B. M., Norton L.D., Carr S., and Ward K. 2002. El sistema aqueel para la captación *in situ* del agua de lluvia: principios y aplicaciones. IX Reunión Nacional Sobre Sistemas de Captación de Agua de Lluvia. Tlaxcala, Tlaxcala, Agosto, 2002. 177-196 pp.

Ventura E. Jr., L.D. Norton., G. Brown and C. Ramsier. 2003. A new tillage system to conserve soil and water while overcoming some of the problems of no-tillage. ISTRO Meeting. Brisbane, Australia. July 14-18, 2003.

Villa S.A. 1981. Los desiertos de México. General technical report wo-28 arid land resource inventories: Developing Cost-Efficient Methods. An International Workshop Noviembre. La Paz, México. 18-20pp.

Wei W., Chen L., Fu B., Huang Z., Wu D y Gui L. 2007. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China. Journal of Hydrology. 335:247– 258.

Wells John T. y Coleman James M., 1981. Physical processes and fine-grained sediment dynamics, coast of Surinam, South America. Journal of Sedimentary Research. Vol. 51. 1053-1068.

Yu J., Lei T., Shainberg I., Mamedov A.I y Levy G.J. 2003. infiltration and erosion in soils treated with dry pam and gypsum. Soil Sci. Soc. Am. J. 67:630–636.