



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

## FACULTAD DE INGENIERÍA

### CONTROL DE LA EROSIÓN EN UN SISTEMA DE RIEGO EN SURCOS Y EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA CON APLICACIÓN DE YESO Y PAM

#### TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
**Maestro en Ciencias**  
(Línea Terminal Hidráulica)

Presenta:

**Ing. Carlos Alberto Chávez García**

Dirigida por:

**Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos**

#### SINODALES

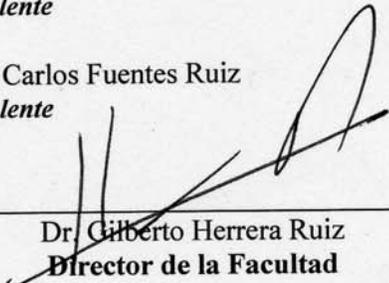
Dr. Eusebio Jr Ventura Ramos  
*Presidente*

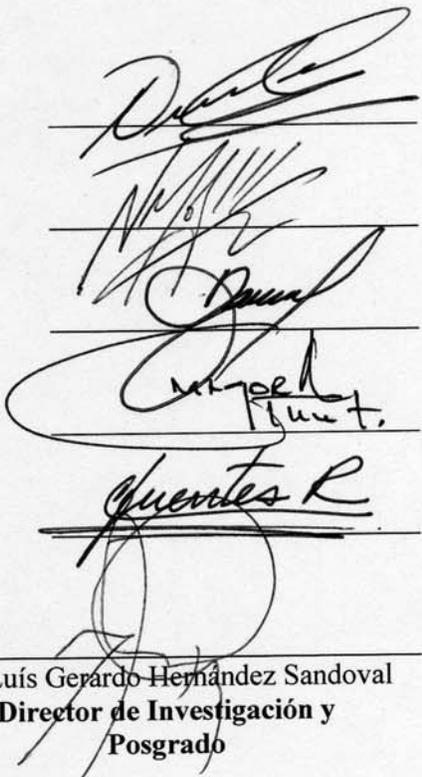
Dr. Nabil Mobayed Khodr  
*Secretario*

Dr. Enrique González Sosa  
*Vocal*

Dr. Manuel Mora Gutiérrez  
*Suplente*

Dr. Carlos Fuentes Ruiz  
*Suplente*

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Gilberto Herrera Ruiz  
**Director de la Facultad**

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval  
**Director de Investigación y  
Posgrado**

## RESUMEN

Los sistemas de riego por gravedad son los más usados en nuestro país; sin embargo, debido a sus bajas eficiencias de aplicación y uso, requieren de un volumen de agua mayor al necesario para satisfacer la demanda hídrica de los cultivos. Adicionalmente, un problema asociado al que no se le ha dado la debida importancia es la erosión por el flujo concentrado en los surcos. Este fenómeno es responsable del abandono de superficies aptas para la agricultura, como consecuencia del arrastre de sedimentos y la reducción de la productividad del suelo. Ante esta problemática, la finalidad del trabajo ha sido evaluar la aplicación de yeso agrícola y poliacrilamida (PAM) como una alternativa viable y sostenible a los problemas planteados. La investigación se dividió en dos etapas: la primera consistió en estudiar el efecto de la aplicación de PAM en el control la erosión en surcos de riego y la segunda en evaluar el efecto combinado del yeso y PAM sobre el uso eficiente del agua. En la primera etapa se evaluaron tres formas de aplicación de PAM sobre un surco simulado de 6 m de longitud: granular sobre el terreno, líquida inyectada en el caudal de entrada y líquida asperjada sobre el terreno. La dosis evaluada en los tres casos fue de 20 kg ha<sup>-1</sup>. Se evaluaron caudales crecientes de entrada desde 75 litros por hora (lph) hasta 250 lph con incrementos de 50 litros El suelo utilizado fue un Vertisol representativo del Bajío. Las muestras de escurrimiento y sedimentos fueron colectadas al final del surco. Los resultados obtenidos muestran que la PAM reduce la erosión con relación al surco-control en alrededor de un 81% para la aplicación granular, mientras que la reducción respectiva fue del 88% para la aplicación líquida inyectada y de alrededor de un 95% cuando la PAM fue asperjada sobre el terreno. Para la segunda etapa se utilizó un sistema de riego por gravedad en surcos, en dos parcelas tipo USLE, usando la avena como cultivo de referencia (*Avena sativa*), sembrada a una dosis de 120 kg ha<sup>-1</sup> y 15 cm de espaciamiento entre surcos. La primera parcela no recibió aplicación de yeso o PAM (control), mientras que a la segunda se aplicó poliacrilamida (PAM) a una dosis de 20 kg ha<sup>-1</sup> y Sulfato de Calcio hidratado (yeso) a una dosis equivalente de 5 t ha<sup>-1</sup>. Para esta etapa, como variables de respuesta se midieron la tensión y el contenido de humedad del suelo con sensores “Water Mark”, la altura de plantas y contenido de clorofila de las mismas. Las variables climáticas fueron registradas con una estación automática. Los resultados obtenidos muestran que la parcela tratada con yeso y PAM obtuvo un rendimiento de forraje verde de 21 t ha<sup>-1</sup>, lo que representa un incremento de 5.5 t ha<sup>-1</sup> más que la parcela de control. La lámina aplicada de agua a la parcela tratada fue de 44 cm, reduciendo en 10 cm la lámina calculada y usada por la parcela-control. Lo anterior implica una mayor eficiencia en el uso del agua, ya que en la parcela con tratamiento se obtuvo un rendimiento de forraje de 6.5 kg m<sup>-3</sup> de agua, comparada con 4.8 kg m<sup>-3</sup> de agua en la parcela-control. La aplicación de PAM es una alternativa viable para el control de la erosión en un sistema de riego en surcos, y combinada con la aplicación de yeso puede incrementar el uso eficiente del agua y la producción de los cultivos.

**Palabras clave:** contenido de humedad, formas de aplicación, rendimiento.

## SUMMARY

Irrigation by gravity is the most widely used system in Mexico; however, due to the low application and use efficiencies, they demand a great amount of water to satisfy the basic water needs of crops. In addition, soil erosion due to the concentrated flow in furrows is an associated problem that has not received the right attention. This phenomenon is responsible for the abandoning of agricultural lands, as a consequence of sediment transport and a reduction in soil productivity. In accordance to this problem, the aim of this study was to evaluate the application of gypsum and polyacrylamide (PAM) as a viable and sustainable alternative to solve the problems. Research work was divided into two parts: the first one consisted in studying the effect of PAM application on soil erosion control in irrigating furrows while the second one consisted in evaluating the combined effect of gypsum and PAM on water use efficiency. Three application forms of PAM (granular on soil surface, liquid injected to the water flow, and liquid sprayed on the soil surface) were evaluated in the first part using a 6-m long simulated furrow. The application rate used for the three forms was the equivalent to  $20 \text{ kg ha}^{-1}$ . Increasing water inflows, from 75 to 250 liters per hour (lph) with step increases of 50 lph were evaluated. The studied soil was a Vertisol, representative of El Bajío region. Runoff and sediment samples were collected at the end of the simulated furrow. The obtained results indicated that PAM application caused a reduction in soil erosion, as compare to the control furrow (no application of PAM), of about 81% for granular application, 88% for liquid injected application and about 95% when PAM was sprayed on the furrows soil surface. For the second part, a gravity irrigation system was used in two USLE-Type plots, using oats (*Avena sativa*) as reference crop. The crop was planted at a rate of  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  with row crop spacing of 15 cm. The first plot did not receive any application of Gypsum or PAM (Control), while the second plot was treated with a PAM application of  $20 \text{ kg ha}^{-1}$  and a gypsum equivalent application of  $5 \text{ t ha}^{-1}$ . Soil water content and tension were measured as response variables in this part of the research using Water Mark sensor. In addition, plant height and chlorophyll content were also measured. Climatic variables were registered using an automated weather station. The obtained results showed that gypsum and PAM application produced fresh forage yield of  $21 \text{ t ha}^{-1}$  in the treated plot,  $5.5 \text{ t ha}^{-1}$  more than the control plot. Water depth applied to the treated plot was 44 cm, reducing in 10 cm the calculated water depth and which was used in the control plot. This implies a greater water use efficiency, since the treated plot produced a forage yield of  $6.5 \text{ kg per m}^3$  of water used, as compared to  $4.8 \text{ kg m}^{-3}$  of water used in the control plot. PAM application is a viable alternative to control soil erosion in furrow irrigating systems and, combined with gypsum, increases water use efficiency and crop yields.

**Key words:** water content, application form, yield.

*A mis padres y hermanas.*

*A Carlitos.*

*A Liz.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT).*

*A la Universidad Autónoma de Querétaro.*

*A los maestros del cuerpo académico: Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos, Dr. Enrique González Sosa, Dr. Nabil Mobayed Khodr, Dra. Klavdia Oleschko, Dr. José Luís Hernández Stefanoni, Dr. Carlos Fuentes Ruiz, Dr. Miguel Ángel Domínguez Cortázar y M.C. Filiberto Luna González.*

*A los revisores del presente trabajo.*

*A mis amigos.*

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	I
<b>SUMMARY</b> .....	II
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	IV
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	VII
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b> .....	IX
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b> .....	3
<b>2.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE EROSIÓN</b> .....	3
2.1.1 Factores que afectan la erosión hídrica .....	4
2.1.2 Formas de erosión hídrica .....	5
2.1.3 El problema de la erosión en México .....	7
<b>2.2 LA PROBLEMÁTICA DEL USO DEL AGUA EN MÉXICO Y EL MUNDO</b> .....	7
2.2.1 Disponibilidad y uso del agua en México .....	10
2.2.2 Usos del agua .....	12
2.2.3 Uso eficiente del agua .....	13
2.2.4 El riego eficiente como ahorrador de agua .....	16
<b>2.3 ECUACIONES BASE DE LA EROSIÓN</b> .....	18
2.3.1 Interacción entre la carga de sedimentos y la capacidad de transporte .....	20
2.3.2 Erosión en surcos .....	21
2.3.3 Corte o incisión del surco .....	22
2.3.4 Geometría del surco .....	23
2.3.5 Esfuerzo crítico de corte .....	23
<b>2.4 EL USO DE YESO Y PAM PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN</b> .....	24
2.4.1 Características físicas y químicas del yeso y la PAM .....	24
2.4.2 Uso de yeso y PAM para control de la erosión .....	29
<b>2.5 OBJETIVOS</b> .....	32
2.5.1 Generales .....	32
2.5.2 Específicos .....	32
<b>2.6 HIPÓTESIS</b> .....	32
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	33
<b>3.1 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO</b> .....	33
3.1.1 Densidad aparente .....	34
3.1.2 Ley de Darcy .....	35
3.1.3 Curva de distribución de agregados .....	36
3.1.4 Determinación del potencial hidrógeno (pH) .....	36

<b>3.2 INSTRUMENTACIÓN PARA MEDIR EL EFECTO DE LA POLIACRILAMIDA EN LA EROSIÓN EN SURCOS.</b>	37
3.2.1 Surco simulado	37
3.2.2 Abastecimiento de agua	39
3.2.3 Tratamientos aplicados	39
3.2.4 Medición de variables	40
3.2.5 Cálculo de la tasa de desprendimiento $D_r$ y esfuerzo crítico de corte $\tau_c$	42
3.2.6 Medición de la erosión del suelo	43
<b>3.3 EXPERIMENTO PARA EVALUAR EL USO EFICIENTE DEL AGUA</b>	44
3.3.1 Presión del agua en el suelo y contenido de humedad	45
3.3.2 Parámetros del cultivo	50
3.3.3 Parámetros del clima	51
<b>4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	52
<b>4.1 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO</b>	52
4.1.1 Densidad aparente	52
4.1.2 Conductividad hidráulica	53
4.1.3 Curva de distribución de agregados del suelo	53
4.1.4 Determinación del pH	56
<b>4.2 EROSIÓN EN SURCOS</b>	57
4.2.1 Tasa de desprendimiento $D_r$	58
4.2.2 Factor de erodabilidad $K_r$	61
4.2.3 Pérdida de sedimentos	63
<b>4.3 USO EFICIENTE DEL AGUA</b>	65
4.3.1 Variables del clima	68
4.3.2 Humedad del suelo	70
4.3.3 Variables de la planta	72
4.3.4 Uso eficiente del agua	75
<b>5 CONCLUSIONES</b>	77
<b>6 REFERENCIAS</b>	79
<b>7 ANEXOS</b>	87

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
1.1 Erosión intensa en una parcela irrigada en surcos recién sembrada con cebada en Guanajuato, México. (Foto: Eusebio Ventura, Diciembre, 2001)	3
2.1 Distribución del agua en el mundo (Fuente ONU, 1997)	8
2.2 Ciclo hidrológico (Fuente: Aparicio, 2005)	9
2.3 Componentes del ciclo hidrológico para la República Mexicana (valores medios anuales en Km <sup>3</sup> ). Fuente: CNA 2005	11
2.4 Volúmenes concesionados para uso fuera de los cuerpos de agua (Acumulado a Diciembre de 2004). Fuente: CNA 2005	12
2.5 Usos del agua en México en Hm <sup>3</sup> (Fuente: CNA 2005)	13
2.6 Patrón de mojado con exceso de riego para determinar la eficiencia de aplicación del agua	15
2.7 Capacidad de Intercambio catiónico	25
2.8 Yeso (Sulfato de calcio dihidratado)	26
2.9 Estructura molecular de la poliacrilamida aniónica	28
3.1 Canal para medir erosión	38
3.2 Sistema de abastecimiento de agua: a) tanque de carga constante, b) Caudalímetro	39
3.3 Esquema de los puntos de medición en el canal (Acotaciones en m)	40
3.4 Parámetros de flujo en secciones rectangulares	41
3.5 Gráfica de los parámetros de cálculo en la erosión en surcos	43
3.6 Parcelas control (izquierda) y tratada (derecha)	44
3.7 Aplicación del riego por compuertas	45
3.8 Sensores WaterMark	45
3.9 Proceso de calibración de sensores WaterMark	46
3.10 Medidor de clorofila SPAD-502	50
3.11 Estación climatológica	51
3.12 a) Tanque evaporímetro tipo A y b) Etgauge modelo A	51
4.1 Derretimiento de la parafina (a y b); e introducción del terrón (c)	52
4.2 Proceso de obtención de la conductividad hidráulica: saturación de la muestra de suelo (a); y medición de la carga a distintos intervalos de tiempo (b y c)	53
4.3 Proceso de obtención de la curva de distribución de agregados	54
4.4 Curva de distribución de agregados en seco y en húmedo	54
4.5 Materiales para el cálculo del Ph	57

4.6	Reducción de la tasa de desprendimiento en los tratamientos vs control	58
4.7	Pérdidas de suelo por evento de riego con y sin tratamiento	59
4.8	Relación lineal del desprendimiento del suelo en los diferentes tratamientos	60
4.9	Valor del factor de erosión $K_r$ ( $m\ s^{-1}$ ) en función de la aplicación de PAM en sus tres formas	62
4.10	Relación potencial del desprendimiento del suelo en los diferentes tratamientos	63
4.11	Pérdida de suelo asociado a diferentes caudales de entrada en los tratamientos aplicados	64
4.12	Pérdida de suelo con diferentes caudales y formas de aplicación de la PAM al terreno	64
4.13	Pérdida de sedimentos en los diferentes tratamientos	65
4.14	Curva de retención de agua experimental y ajustada con la ecuación (25), con $\theta_r = 0.0000\ m^3/m^3$ , $\theta_s = 0.4000\ m^3/m^3$ , $\psi_d = 12.84\ cb$ , $m = 0.185$ y $n = 3.903$	66
4.15	Calendario de riego calculado con el programa CropWat 4 versión 4.3	67
4.16	Evaporación medida con EtGauges Modelo A y Tanque Evaporímetro	68
4.17	Correlación de la evaporación medida con ETGauges modelo A y Tanque Evaporímetro tipo A	69
4.18	Temperatura promedio registrada en la estación climatológica	69
4.19	Proceso de humedecimiento y secado del suelo	71
4.20	Curva de humedecimiento y secado del suelo al primer riego	71
4.21	Curva de crecimiento del cultivo	72
4.22	Estado de la planta al momento de la cosecha: izquierda (Referencia), derecha (yeso + PAM)	73
4.23	Rendimiento del cultivo al término de la producción	74
4.24	Evolución del contenido de clorofila en las parcelas	75
4.25	Volumen de agua calculado y aplicado	76

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro</b>	<b>Página</b>
1.1 Comparación de los métodos de riego	18
4.1 Cálculo de la densidad aparente	52
4.2 Cálculo del diámetro medio ponderado en seco	55
4.3 Cálculo del diámetro medio ponderado en húmedo	56
4.4 Resumen de los resultados obtenidos de la aplicación de PAM. Ecuación lineal	57
4.5 Resumen de los resultados obtenidos de la aplicación de PAM. Ecuación potencial	62
4.6 Calibración de sensores Water Mark	66

## 1 INTRODUCCIÓN

La agricultura en México utiliza anualmente cerca del 76% del total de agua disponible (CNA, 2005). La mayoría de los agricultores que hacen uso de ella operan con sistemas de riego por gravedad cuyas eficiencias de aplicación a nivel parcelario son menores a 50%, lo cual reduce la superficie que se puede regar y aumenta la sobreexplotación de los acuíferos ante la demanda del vital líquido (Aldama, 1998). Esta reducción se relaciona con la baja disponibilidad de volúmenes de agua captados durante el temporal. Sin embargo, parte de la baja eficiencia en el uso del agua está asociada con el sellamiento superficial y la erosión del suelo en los sistemas de riego por gravedad con flujo concentrado, tales como el riego en surcos.

El problema relacionado radica en el hecho de que, en su mayoría, los sistemas de riego desperdician agua. Algunos estudios realizados por CNA (2005) han estimado que sólo entre 15% y 50% del agua extraída para la agricultura de regadío llega a la zona de cultivos. La mayor parte se pierde durante la conducción o por evaporación antes de llegar a los campos de cultivo. Si bien parte del agua "perdida" en los sistemas de riego ineficientes retorna a las corrientes de agua o acuíferos, de donde puede volver a extraerse, su calidad se degrada por el lavado de contaminantes tales como los plaguicidas, fertilizantes y sales que se lixivian por el suelo, pero en otros casos -como en el Bajío donde el nivel freático del acuífero está por debajo de 100 m (CNA, 2005)- su extracción eleva los costos de operación provocando una reducción en las ganancias del usuario.

En México y en el mundo, el sistema de riego más usado sigue siendo el *riego por gravedad en surcos*. Las leyes que rigen el flujo del agua en este sistema son las mismas que las de la hidráulica de canales abiertos (Chaudhry, 1993). El flujo concentrado representa también una capacidad de desprendimiento y transporte de partículas de suelo, ocasionando un fenómeno al que poco interés se le ha dedicado: la erosión del suelo en sistemas de riego en surcos.

En México y otros países latinoamericanos existe poco interés en el problema de la erosión generada por el riego de gravedad, porque se considera que este proceso no ocurre en terrenos de poca pendiente con irrigación. Normalmente, como el riego se aplica en

terrenos de pendientes leves, no se considera a la erosión como un problema, aún cuando se reportan tasas de movimiento de suelo del orden de 5 a 50 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. De tres a ocho veces el promedio de la erosión en una parcela ocurre cerca de las cabeceras de entrada de agua a los surcos (Berg y Carter, 1980; Fornstrom y Borelli, 1984; Kemper *et al.*, 1985). Entonces, la productividad de la agricultura de riego se ve seriamente afectada por la pérdida de suelo fértil de los suelos inducida por el riego de gravedad (Carter, 1993).

Actualmente se ha tratado de eficientizar el uso de agua mediante técnicas de riego más sofisticadas tales como los riegos presurizados, los cuales son usados por varios países como el caso de México, para ahorrar agua y proteger los suelos. Hay programas de tecnificación de riego pero su alcance ha sido limitado y en muchos casos sólo se ha iniciado el uso de tubería de PVC para la conducción, pero no se ha tecnificado la forma de aplicación. Sin embargo, la necesidad de producir más alimentos requiere de un mejor aprovechamiento de los escasos recursos hídricos, lo que ha obligado a los investigadores a buscar otras alternativas de mejoramiento de los sistemas ampliamente usados, que son los sistemas de riego por gravedad, entre ellos el riego en surcos.

En México, existen evidencias de una redistribución considerable del suelo a lo largo de los surcos de riego y hacia los canales de conducción. Anualmente se gastan millones de pesos en el desazolve de acequias y canales, producto de la sedimentación cuya única fuente de sedimentos son las parcelas de riego (CNA, 2005).

Por su economía, el riego en surcos seguirá usándose en la agricultura de riego en México, por lo que se deben de realizar esfuerzos para hacer un uso más eficiente del agua en este sistema y controlar la erosión de suelos. Los sellos superficiales y la erosión son responsables de la pérdida de extensas superficies de terrenos agrícolas y de la reducción de la productividad agrícola a través del mundo (Figura 1.1).

El objetivo del presente proyecto entonces es evaluar el efecto de la aplicación de yeso agrícola y poliacrilamida (PAM) como una alternativa viable y sustentable para controlar la erosión de los suelos en los sistemas de riego por gravedad en surcos, y para aumentar la eficiencia en el uso del agua.



**Figura 1.1.** Erosión intensa en una parcela irrigada en surcos recién sembrada con cebada en Guanajuato, México. (Foto: Eusebio Ventura, Diciembre, 2001).

## **2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE EROSIÓN**

La erosión es la remoción del material superficial del suelo causado por efectos del agua o el viento (Kirkby, 1984). Está originada por varios factores, tales como las pendientes pronunciadas el clima, la inadecuada utilización del suelo, el tipo de cubierta vegetal y los desastres naturales, sin embargo, las actividades humanas pueden acelerar en gran medida las tasas de erosión. Este fenómeno es considerado como un problema severo, debido a que se encuentra asociado con prácticas inapropiadas de agricultura, sobrepastoreo, mal aprovechamiento de los bosques, matorrales, pastizales, selvas, y cambios de uso de suelos de terrenos forestales para uso agropecuario principalmente.

De acuerdo con Becerra (2005), los dos principales tipos de erosión son la erosión geológica y la erosión acelerada. La erosión geológica incluye tanto los procesos de formación como erosionantes, los cuales mantienen al suelo en un balance favorable, y adecuado para el crecimiento de las plantas. La erosión acelerada incluye el deterioro y pérdida de suelo como resultado de las actividades humanas.

La erosión geológica se encuentra cuando el suelo se encuentra en su ambiente natural bajo la cubierta de vegetación nativa. Este tipo de erosión es responsable de la formación de los suelos y su distribución en la superficie de la Tierra. El efecto en el largo plazo de este tipo de erosión ha originado características topográficas tales como cañones, meandros de ríos, y valles. En otras palabras, este tipo de erosión es el resultado de la acción del agua, viento, gravedad y glaciares.

La erosión acelerada es la pérdida de suelo asociada normalmente con cambios en la cobertura vegetal y en las condiciones del suelo y es causada principalmente por el agua y el viento. Las fuerzas involucradas en la erosión acelerada son: (1) fuerzas de ataque, las cuales remueven y transportan las partículas de suelo, (2) fuerzas de resistencia, las cuales limitan la erosión.

La erosión de los suelos es la fuente principal ha sido responsable de la disminución paulatina de la fertilidad y en consecuencia la capacidad productiva de los suelos. La erosión causada por el agua o erosión hídrica, incluye la acción de la lluvia y el escurrimiento superficial.

### **2.1.1 Factores que afectan la erosión hídrica**

Las variables que afectan mayormente a la erosión hídrica son el clima, el suelo, la vegetación, y la topografía (Becerra, 2005).

*Clima.* Los factores climáticos que afectan la erosión son la precipitación, temperatura, viento, humedad y radiación solar. La temperatura afecta la evapotranspiración, mientras que el viento tiene un efecto en la velocidad y ángulo de impacto de las gotas de lluvia. La humedad y la radiación se involucran desde el momento en que están relacionadas con la

temperatura. La relación más directa es la de las características de la precipitación y la erosión y escurrimiento superficial.

*Suelo.* Las propiedades del suelo afectan la capacidad de infiltración y la estabilidad de los agregados del suelo, lo que en consecuencia regula la cantidad de suelo desprendido y transportado. Las propiedades de suelo relacionadas con los aspectos anteriores son la textura, estructura, contenido de materia orgánica, humedad del suelo, densidad, así como otras propiedades químicas y biológicas.

*Vegetación.* Los efectos mayores de la vegetación en la reducción de la erosión son (1) la interceptación de la lluvia y absorción de la energía de las gotas de lluvia, (2) retardamiento de erosión mediante la disminución de la velocidad del escurrimiento, (3) retención del suelo por efecto de raíces, (4) mejoramiento de la agregación por las raíces y descomposición de residuos de cosecha, y (5) incremento de la actividad biológica en el suelo. La efectividad de la vegetación en el control de la erosión depende del tipo de vegetación, su estructura, tipo de raíces, cobertura aérea y tipo de residuos producidos, entre otros.

*Topografía.* El grado y longitud de pendiente, así como la forma topográfica existente determinan en gran medida la severidad de la erosión en ausencia de una cubierta vegetal protectora.

Los factores climáticos no son controlables por el hombre, pero las características del suelo pueden ser mejoradas para hacer un suelo más resistente a la erosión y la topografía puede ser modificada hasta cierto punto para reducir la severidad de la erosión hídrica.

### **2.1.2 Formas de erosión hídrica**

En general, la erosión hídrica se divide en erosión de las gotas de lluvia o salpicado, erosión laminar, erosión en surcos, erosión en cárcavas y en canales de riego.

El salpicado de suelo se origina cuando las gotas de lluvia caen directamente sobre las partículas de suelo o superficies de agua muy delgadas, salpicando cantidades enormes de suelo debido a la energía cinética de impacto. En suelos a nivel, la dispersión de suelo es

más o menos uniforme en todas las direcciones, pero en un terreno con pendiente habrá un transporte neto hacia abajo. Si durante el proceso ocurre flujo superficial, las partículas removidas son incorporadas en el flujo y serán transportadas aguas abajo antes de ser depositadas de nuevo en la superficie.

La erosión laminar elimina uniformemente el suelo en estratos delgados, como consecuencia del flujo superficial laminar que escurre en capas delgadas sobre el terreno. Las gotas de lluvia provocan el desprendimiento de las partículas de suelo y, al aumentar el sedimento, se llenan los poros de la capa superficial, reduciendo así la razón de infiltración. La fuerza abrasiva y la de arrastre de la corriente laminar están en función de la profundidad y la velocidad de escurrimiento para una partícula o agregado de suelo de tamaño, forma y densidad determinados.

La erosión en surcos ocurre cuando el flujo superficial se concentra, el agua actúa sobre el suelo desprendiéndolo y originando canales o arroyos pequeños. Este tipo canales se vuelven estables y se les ve con facilidad. El desprendimiento y el transporte son más severos porque las velocidades de escurrimiento son más altas y el esfuerzo hidráulico cortante aumenta con el grado de la pendiente y el radio hidráulico de la sección del canal.

La erosión en cárcavas abre canales mayores que los surcos, los cuales conducen agua durante o inmediatamente después de las lluvias. La erosión que origina cárcavas es una etapa avanzada de la que produce la erosión en surcos, del mismo modo que ésta, es una etapa posterior a la erosión laminar.

La erosión en canales de riego es debido a que el desprendimiento del suelo y el transporte del mismo son más severos, esto porque la velocidad de caudal en el canal es mayor que el causado por efectos de la lluvia. Aumentado el desprendimiento del suelo con el grado de la pendiente y el radio hidráulico de la sección del canal.

### **2.1.3 El problema de la erosión en México**

Las condiciones fisiográficas y climáticas favorecen en forma natural la degradación de los suelos por la erosión. La topografía de México es en su mayoría de pendiente pronunciada con excepción de las planicies costeras y los valles. Esto asociado a las condiciones climáticas de alta precipitación en los trópicos y lluvias escasas pero torrenciales (de poca duración y alta intensidad) en las zonas semiáridas hace de la erosión un fenómeno fácilmente observable en áreas extensas.

La extinta secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (S.A.R.H.) reportó en 1982 que más del 80 % de los suelos agrícolas se encontraban afectados por diversos grados de erosión, de la misma manera, se reportaba que el 4.57% del territorio nacional se encontraba completamente erosionado y que más del 48% de los terrenos del país presentaban erosión de moderada a severa. Por otra parte, la UACh (1999) estimó que más del 65% de la superficie del país está afectado por un grado de erosión, sin embargo, a la fecha este valor debe ser mucho mayor, pero aún no se ha estimado.

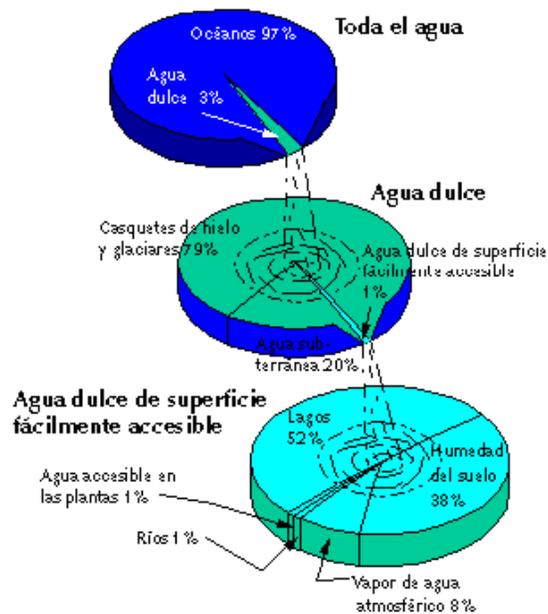
Los riegos excesivos y el mal manejo del agua han propiciado el abandono de grandes extensiones de terreno debido a que han dejado de ser productivas como consecuencia del proceso de la erosión en surcos. Este proceso no tiene la atención necesaria y los estudios realizados son escasos, esto es porque el proceso se da de manera gradual y es considerado en la mayoría de los casos nulo. Sin embargo, con el paso del tiempo se aprecia el daño y en muchas veces es demasiado tarde para corregir el problema.

## **2.2 LA PROBLEMÁTICA DEL USO DEL AGUA EN MÉXICO Y EL MUNDO**

Un 70% de la superficie de la tierra es agua, pero la mayor parte de ésta es oceánica. En volumen, sólo 3% de toda el agua del mundo es agua dulce, y en su mayor parte no está disponible. Unas tres cuartas partes de toda el agua dulce es inaccesible, en forma de casquetes de hielo y glaciares situados en zonas polares muy alejadas de la mayor parte de los centros de población; sólo un 1% es agua dulce superficial fácilmente accesible.

El agua que se encuentra en los lagos y ríos y a poca profundidad en el suelo, puede extraerse sin mayor costo. Sólo esta cantidad de agua se renueva habitualmente con la

lluvia y las nevadas y es, por tanto, un recurso sostenible (Figura 2.1). En total, sólo un centésimo del uno por ciento del suministro total de agua del mundo se considera fácilmente accesible para uso humano (ONU, 1997).

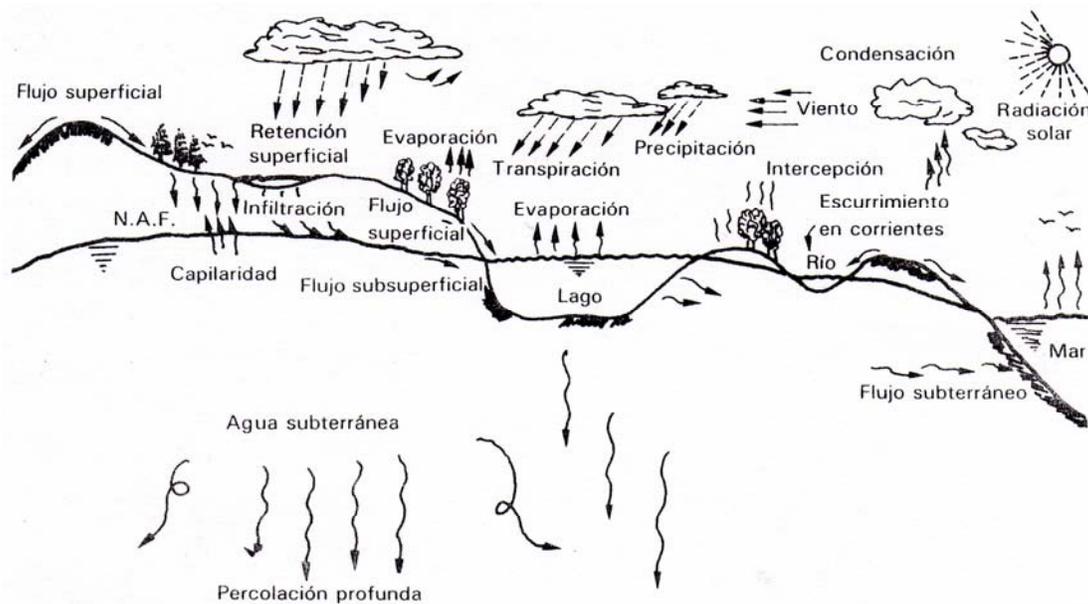


**Figura 2.1.** Distribución del agua en el mundo (Fuente: ONU, 1997)

Se considera que, mundialmente, se dispone de 12,500 a 14,000 millones de metros cúbicos de agua por año (12,500 a 14,000 kilómetros cúbicos) para uso humano. Esto representa unos 9,000 metros cúbicos por persona por año (ONU, 1997). En este mismo estudio, se proyecta que al año 2025 la disponibilidad global de agua dulce per cápita descenderá a 5,100 metros cúbicos por persona, al sumarse otros 2,000 millones de habitantes a la población del mundo. Aún entonces, esta cantidad sería suficiente para satisfacer las necesidades humanas si el agua estuviera distribuida por igual entre todos los habitantes del mundo.

Pero las cifras per cápita sobre la disponibilidad de agua presentan un cuadro engañoso. El agua dulce mundialmente disponible no está equitativamente distribuida en el mundo, ni en todas las estaciones del año, ni de un año a otro. En algunos casos el agua no está donde la queremos, ni en cantidad suficiente. En otros casos tenemos demasiada agua en el lugar equivocado y cuando no, hace falta.

El ciclo hidrológico de la tierra actúa como una bomba gigante que continuamente transfiere agua dulce de los océanos a la tierra y de vuelta al mar (Figura 2.2). En este ciclo de energía solar, el agua se evapora de la superficie de la tierra a la atmósfera, de donde cae en forma de lluvia o nieve. Parte de esta precipitación vuelve a evaporarse dentro de la atmósfera. Otra parte comienza el viaje de vuelta al mar a través de arroyos, ríos y lagos. Y otra parte se filtra dentro del suelo y se convierte en humedad del suelo o en agua de superficie. Las plantas incorporan la humedad del suelo en sus tejidos y la liberan en la atmósfera en el proceso de evapotranspiración. Gran parte del agua subterránea finalmente vuelve a pasar al caudal de las aguas de superficie.



**Figura 2.2. Ciclo hidrológico (Fuente: Aparicio, 2005)**

El ciclo hidrológico no ofrece garantías a la humanidad. Unas tres cuartas partes de las precipitaciones anuales caen en zonas que contienen menos de un tercio de la población mundial. Dicho a la inversa, dos tercios de la población mundial viven en zonas que reciben sólo un cuarto de las precipitaciones anuales del mundo. Por ejemplo, un 20% de la escorrentía media mundial por año corresponde a la cuenca amazónica, una vasta región con menos de 10 millones de habitantes, o sea, una minúscula fracción de la población mundial.

De manera similar, el río Congo y sus tributarios representan un 30% de la escorrentía anual del entero continente africano, pero esa cuenca hidrográfica contiene sólo 10% de la población de África (Maderey, 2005).

Más de la mitad de la escorrentía global tiene lugar en Asia y Sudamérica (31% y 25%, respectivamente). Pero si se considera la disponibilidad per cápita, Norteamérica tiene la mayor cantidad de agua dulce disponible, con más de 19,000 metros cúbicos por año. En cambio, la cantidad per cápita es apenas superior a 4,700 metros cúbicos en Asia (incluido el Cercano Oriente) (ONU, 1997).

Tomada por país, la cantidad de agua dulce renovable disponible anualmente per cápita varía desde más de 600,000 metros cúbicos en Islandia a sólo 75 metros cúbicos por persona en Kuwait, de acuerdo a lo estimado en 1995.

La disponibilidad de agua también exhibe notables diferencias dentro de los países. En México, menos del 10% de la extensión territorial proporciona más de la mitad de la escorrentía nacional del agua de lluvia. Pese al hecho de que 90% de México es árido y crónicamente escaso de agua, la disponibilidad total de agua per cápita en 1990 era de más de 4,000 metros cúbicos. Esta cifra es sumamente engañosa como medida de la disponibilidad real de agua para la mayoría de los mexicanos (CNA, 2005).

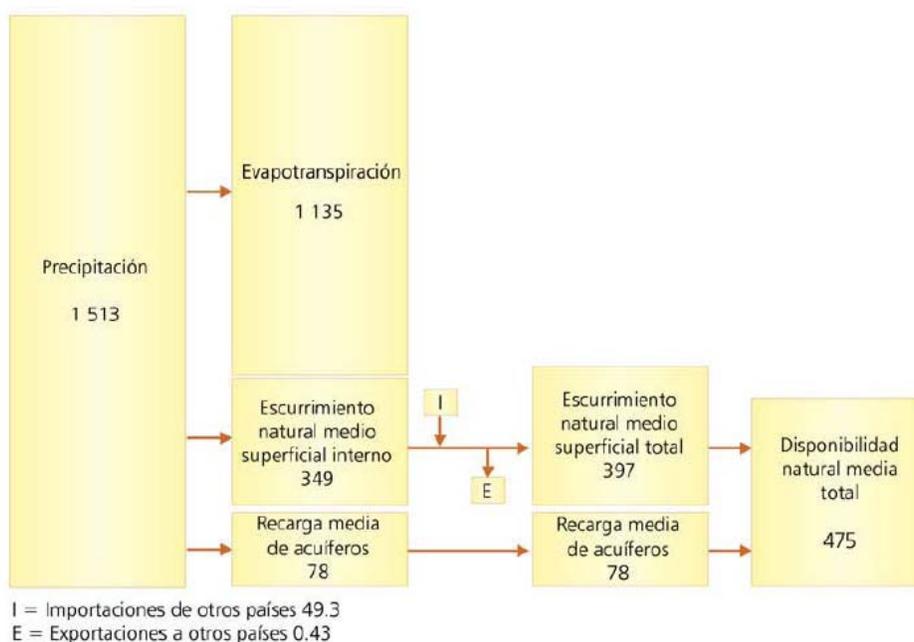
### **2.2.1 Disponibilidad y uso del agua en México**

México, un país rico en recursos naturales, obtiene el agua que consume la población de fuentes tales como ríos, arroyos y acuíferos del subsuelo. Estos acuíferos se recargan de forma natural en época de lluvias. Sin embargo, la estación lluviosa tiene una duración promedio de cuatro meses lo que propicia una escasa captación. Aunado a esto, del total de agua captada en las fuentes de almacenamiento, aproximadamente el 70% se evapora (CNA, 2005).

La desproporción que existe entre la cantidad de agua que se capta por escurrimiento, las extensiones territoriales que comprenden y la corta temporada de lluvias hace que la disponibilidad del agua sea cada vez menor. Bajo este panorama, México enfrenta actualmente graves problemas de disponibilidad, desperdicio y contaminación del agua.

Parte de esta problemática se enfrenta con la escasa construcción de infraestructura hidráulica que permite satisfacer la demanda de agua a los diferentes sectores de la población: agrícola, industrial, doméstico y de servicios, generación de energía eléctrica, entre otros. No obstante existen diferencias territoriales importantes que son desfavorables. En el norte del territorio nacional, el agua de lluvia que se capta por escurrimiento es únicamente el 4% mientras que en el sureste y las zonas costeras se logra captar el 50% del escurrimiento. Así, entre otros beneficios de la infraestructura hidráulica se encuentra la protección a la población y las áreas productivas de situaciones como las inundaciones, además de aprovechar las zonas con alto promedio de escurrimientos para la generación de servicios como la energía eléctrica.

La zona norte del país está constituida por regiones áridas y las presas tienen la función de captar el agua que se utilizará en la actividad agrícola. En la zona sur del país, donde se localizan las regiones húmedas, las presas tienen como función almacenar el agua para la generación de la energía eléctrica y el control de avenidas. En la Figura 2.3 se muestran de manera simplificada los componentes del ciclo hidrológico para nuestro país.



**Figura 2.3.** Componentes del ciclo hidrológico para la República Mexicana (valores medios anuales en Km<sup>3</sup>).

Fuente: CNA 2005

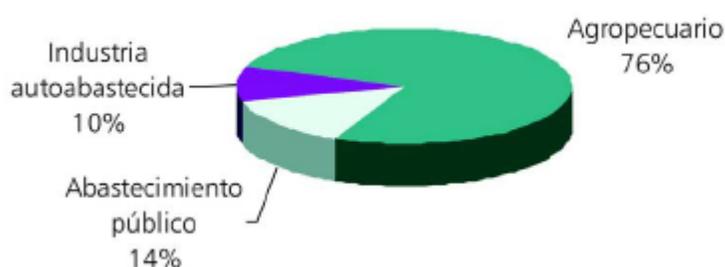
Las importaciones de otros países se refieren al volumen de agua que es generado en los países con los que México comparte cuencas (Estados Unidos de América, Guatemala y Belice) y que escurren hacia México. Las exportaciones se refieren al volumen de agua que México debe entregar a Estados Unidos de América conforme al Tratado de Aguas de 1944. (CNA, 2005).

### 2.2.2 Usos del agua

Se distinguen dos tipos de usos del agua:

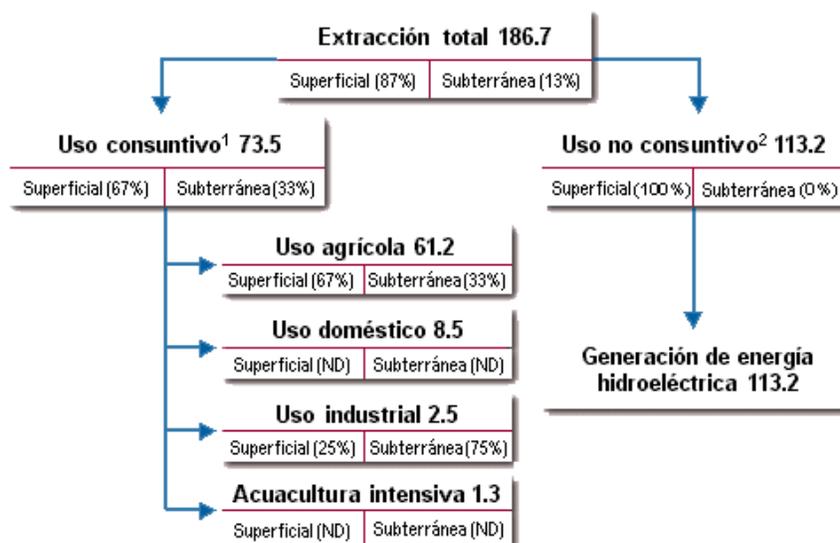
- Usos consuntivos: el agua es transportada a su lugar de uso y la totalidad o parte de ella no regresa al cuerpo de origen.
- Usos no consuntivos: el agua es utilizada en el mismo lugar de almacenamiento o con un desvío mínimo, como en el caso de las plantas hidroeléctricas.

No se sabe con exactitud cuánta agua se utiliza en el país; sin embargo, se cuenta con el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) en el cual se tienen los volúmenes concesionados o asignados a los usuarios de aguas nacionales. Se infiere que los usuarios utilizan aproximadamente el mismo volumen que tienen concesionado o asignado y se considera que la gran mayoría de los usuarios ya se encuentran inscritos en el REPDA (CNA, 2005). De acuerdo con la Figura 2.4, el usuario utiliza el 76% del agua concesionada para fines agropecuarios, 10% para la industria autoabastecida y solamente el 14% para el uso urbano.



**Figura 2.4.** Volúmenes concesionados para uso fuera de los cuerpos de agua (acumulado a diciembre de 2004). Fuente: CNA 2005

En la Figura 2.5 Se observa que el 60.6% del aprovechamiento de las aguas superficiales se utilizan para generar energía eléctrica, mientras que el 39.4% se emplea para uso consuntivo. De éste, el 67% son escurrimientos superficiales y 33% proviene de la extracción de los mantos freáticos. No obstante, de los 73.5 Hm<sup>3</sup> destinados para uso consuntivo, la agricultura utiliza 61.2 Hm<sup>3</sup>, mismos que corresponden al 83% del total del volumen de agua destinada.



**Figura 2.5.** Usos del agua en México en Hm<sup>3</sup> (Fuente: CNA, 2005)

La cantidad de agua utilizada en el sector agrícola, la mayoría de las veces, es superior a la que necesitan los cultivos en su desarrollo fenológico, esto debido a las pérdidas por conducción; pero el problema más grave lo ocasionan las bajas eficiencias de aplicación, haciendo que el riego por gravedad sea el menos eficiente y el que más desperdicia agua (Escalante, 1995). De aquí surge la necesidad de buscar nuevas metodologías que permitan mejorar la eficiencia de aplicación y aumentar el rendimiento de los cultivos.

### 2.2.3 Uso eficiente del agua

El concepto de “uso eficiente del agua” incluye cualquier medida que reduzca la cantidad de agua que se utiliza en cualquier actividad y favorezca el mantenimiento o mejoramiento de su calidad (Tate, 1991); está relacionado con otros conceptos básicos del manejo actual de recursos ambientales y, en muchos casos, forma parte integral de ellos. El concepto más

arraigado es la conservación del agua, mismo que se ha definido de muchas maneras, pero tal vez Baumann (1980) sea el más atinado, al referirse al uso eficiente del agua como a cualquier reducción o prevención de pérdida del agua en beneficio de la sociedad. Al mismo tiempo, la definición de la conservación sugiere que las medidas de eficiencia deben tener sentido social y económico, además de reducir el uso del vital líquido por unidad de actividad. Para evaluar la eficiencia de los sistemas de riego es conveniente introducir algunas definiciones clásicas de la misma.

En un sistema de riego la finalidad es el suministro de agua a partir de una fuente de abastecimiento, como un vaso de almacenamiento o un acuífero, para satisfacer los requerimientos de agua necesarios para el desarrollo óptimo de las plantas, la eficiencia global se define como la razón entre el volumen de agua en la zona de raíces ( $V_r$ ) y el volumen suministrado por la fuente ( $V_t$ ), a saber:

$$E = \frac{V_r}{V_t} \quad (2.1)$$

Con fines de manejo de los componentes de un sistema de riego es conveniente separar los efectos de la conducción y de la aplicación del agua en la eficiencia global. La eficiencia de conducción se define como la razón entre el volumen servido en la toma parcelaria ( $V_p$ ) y el volumen suministrado por fuente de abastecimiento ( $V_t$ ):

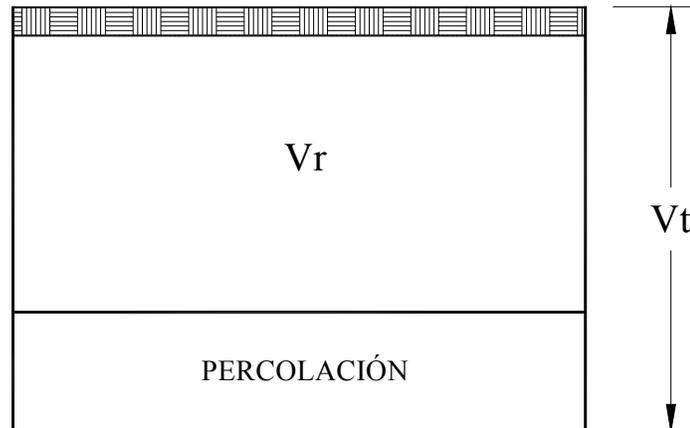
$$E_c = \frac{V_p}{V_t} \quad (2.2)$$

La eficiencia de aplicación se define como la razón entre el volumen de agua necesario en la zona de raíces ( $V_r$ ) y el volumen de agua servido en la toma parcelaria ( $V_p$ ) (ver Figura 2.6), o sea:

$$E_a = \frac{V_r}{V_p} \quad (2.3)$$

Claramente la eficiencia global es el producto de las eficiencias de conducción y de aplicación:

$$E = E_c \times E_a \quad (2.4)$$



**Figura 2.6.** Patrón de mojado con exceso de riego para determinar la eficiencia de aplicación del agua

Casi la totalidad de la superficie irrigada en México, alrededor del 96%, como ocurre en la mayoría de los países en desarrollo, se riega por sistemas de riego por gravedad, lo que no favorece el uso eficiente del agua. Las causas de la baja eficiencia en los sistemas de riego por gravedad pueden ser muy diversas. No obstante, Palacios (1990), realizando mediciones en algunos de los sistemas de riego más importantes de México, concluyó que los principales orígenes son los siguientes:

- Evaporación en canales y ríos
- Infiltración en conducción
- Fugas en estructuras en mal estado
- Desperdicios por manejo incorrecto

La eficiencia en la conducción, es decir entre los almacenamientos y el sistema de distribución a nivel parcela, oscila alrededor del 60%. Del total de las pérdidas por conducción antes anotadas, se estima que la evaporación contribuye con el 5%, mientras que las fugas, infiltración y manejo son responsables del 30, 30 y 35% del total,

respectivamente. La eficiencia en la aplicación del agua de riego a nivel parcelario es muy variable. Refiriéndose siempre a sistemas por gravedad, se estima que oscila entre un 75% en los distritos de riego más tecnificados, hasta apenas 35% en otros.

Tanto por razones técnicas como financieras, es cada vez más difícil construir nuevas obras. Las grandes presas prácticamente han dejado de construirse. De manera natural, los ingenieros optaron por construir primero en los sitios menos complicados, y que ofrecían las mejores posibilidades de alcanzar los mayores beneficios, por ello las dificultades técnicas ahora son mayores, y las utilidades de los proyectos tienden a disminuir. Esta situación no se restringe solamente a la construcción de las obras de captación, sino que se refleja también el costo total de la infraestructura de conducción y distribución. Como consecuencia, el costo por hectárea de riego es cada vez mayor.

#### **2.2.4 El riego eficiente como ahorrador de agua**

Puesto que la agricultura utiliza casi el 70% del agua extraída de ríos, lagos y acuíferos subterráneos, el incremento de la eficiencia de riego es la opción que ofrece mayores posibilidades para la conservación del agua (Clarke, 1991).

Ante ello, se ha estado trabajando en formas para ahorrar agua en la agricultura y es como nace el mejoramiento de la eficiencia con técnicas de riego más sofisticadas, como en el caso de los riegos presurizados. Estos sistemas no están al alcance de los agricultores de la población rural; sin embargo, las presiones para alimentar a las poblaciones rápidamente crecientes requieren un aprovechamiento mejor de los recursos de agua dulce, lo que ha obligado a los investigadores a buscar otras alternativas para almacenar el agua en el suelo por un periodo más largo de tiempo.

En varios estudios se ha demostrado que el empleo de riego por goteo incrementa el ahorro y la eficiencia del uso del agua con respecto al riego por surcos (Al-Jamal *et al.*, 2001; Fahon *et al.*, 2004; Mailhol *et al.*, 2004; Xi-Ping *et al.*, 2006), debido principalmente a que en éste último se requiere aplicar suficiente agua para humedecer la zona radicular de los sitios alejados de la fuente de abastecimiento del surco (Benjamín *et al.*, 1998).

En investigaciones previas, se obtuvieron índices de eficiencia de  $0.49 \text{ kg m}^{-3}$  en riego por aspersión y  $0.44 \text{ kg m}^{-3}$  en riego por surcos con ajo (Ellis *et al.*, 1986); con el mismo cultivo Lamm *et al.* (1995) reportaron valores de  $0.56 \text{ kg m}^{-3}$  en riego por surcos y  $0.659 \text{ kg m}^{-3}$  para riego por aspersión; Patel *et al.* (1996), con riego por goteo, registraron valores de 1.4 hasta  $1.7 \text{ kg m}^{-3}$  y en riego por surcos de  $0.9 \text{ kg m}^{-3}$  y Al-Jamal *et al.* (2001), encontraron valores máximos de  $5.9 \text{ kg m}^{-3}$  en riego por goteo y  $4.6 \text{ kg m}^{-3}$  en riego por surcos trabajando con cebolla; Angus *et al.* (2000) reportaron incrementos en el uso de agua en riego por surcos al ahorrar 23 mm de lámina de riego aplicando fertilizante nitrogenado; y Cetin y Bilgel (2002) reportaron 30% más de rendimiento en riego por goteo que en riego por gravedad en cultivo de algodón.

Puede verse que el uso eficiente del agua tuvo mayores incrementos al usar los sistemas de riego presurizados; sin embargo, las bajas eficiencias obtenidas en el riego por gravedad pueden deberse a un mal manejo de la tensión de humedad del suelo (Mandal *et al.*, 2002), y a la desproporción entre la demanda de agua y la que se le otorga al suelo en el manejo del mismo, en particular, el ahorro del agua y la conservación de la agricultura de riego (Hors *et al.*, 2005).

Palacios (1990) realizó una comparación de los métodos de riego más comúnmente usados, los cuales son descritos en el Cuadro 1.1. Como se observa, el método de riego en surcos es el que presenta las mayores pérdidas de agua causadas por evaporación, además de presentar escurrimientos superficiales que llevan consigo la degradación del suelo causada por el flujo concentrado. El uso eficiente del agua registrado es el más bajo con relación al riego por goteo y por aspersión. De hecho, el interés del presente estudio se centra en estas dos últimas técnicas de riego, dada su importancia en cuanto al manejo y conservación del recurso.

**Cuadro 1.1. Comparación de los métodos de riego.**

TOPICO	Riego por surcos	Riego por aspersión	Riego por goteo
Perdida por evaporación	Alta	Mediana	Mínima
Humedecimiento del follaje	Mediano	Alto	Mínimo
Consumo de agua por maleza	Alto	Alto	Mínimo
Escurrimiento superficial	Alto	Mediano	Mínimo
Control en la profundidad de riego.	Mínimo	Mediano	Alto
Rendimiento por unidad de agua aplicada	Mínimo	Mediano	Alto
Uniformidad en el rendimiento	Mediano	Mediana	Alta
Aereación del Suelo	Poca	Poca	Alta
Interferencia del riego con otras tareas.	Alta	Alta	Baja
Aplicación del abono y plaguicidas a través del agua de riego	Mínima	Moderado	Alta
Costos de operación y mano de obra	Bajo	Moderado	Alto
Requerimiento de nivelación del terreno	Alto	Bajo	Mínimo
Automatización del sistema	Bajo	Alto	Alto
Requerimientos de energía	Bajo	Alto	Alto
Calidad de agua	Mínima	Moderado	Alto
Uso de filtros	Mínima	Moderado	Alto
Control de enfermedades y plagas	Mínimo	Moderado	Alto

Fuente: Palacios (1990)

### 2.3 ECUACIONES BASE DE LA EROSIÓN

El proceso de erosión hídrica de suelos esta asociado a la acción de dos tipos de fuerzas: hidráulicas y de resistencia. Las primeras rompen y remueven las partículas y las transportan por los cauces, y las segundas, de naturaleza electroquímica, impiden de alguna manera su desprendimiento. El esfuerzo cortante que actúa sobre el fondo de un cauce o canal, o sobre la superficie del suelo, es una de las variables más significativas de las fuerzas hidráulicas y su determinación se deriva de la ecuación de momentum para flujo uniforme en un canal abierto (Chow *et al.*, 1994).

La erosión en surcos es un fenómeno que involucra el desprendimiento de las partículas del suelo y el transporte de las mismas por efecto de la fuerza de arrastre del agua. La depositación de los sedimentos es resultado de las dos fases anteriores, los cuales son

acarreados a través de los surcos y desembocados en los límites del terreno, trayendo consigo problemas de sedimentación en la red de drenaje, que posteriormente son traducidos en pérdidas económicas para el usuario por los trabajos de rehabilitación que se necesitan para su óptimo funcionamiento.

La ecuación básica en el proceso de erosión en surcos y entre surcos es la ecuación de continuidad de sedimentos para flujo no permanente con poca profundidad (Foster, 1982):

$$\frac{\partial q_s}{\partial x} + \rho_s \frac{\partial(cy)}{\partial t} = D_r + D_i \quad (2.5)$$

donde  $q_s$  es la carga de sedimentos [ $ML^{-1}T^{-1}$ ];  $x$  la distancia aguas abajo [ $L$ ];  $\rho_s$  la densidad de masa de las partículas [ $ML^{-3}$ ];  $c$  la concentración de sedimentos [ $ML^{-2}T^{-1}$ ];  $y$  el tirante del agua [ $L$ ];  $t$  el tiempo [ $T$ ];  $D_r$  la erosión en surcos [ $ML^{-2}T^{-1}$ ] y  $D_i$  la erosión entre surcos [ $ML^{-2}T^{-1}$ ].

El término  $\partial q_s / \partial x$  representa el cambio en la tasa de flujo de sedimentos pendiente abajo y el término  $\rho_s \partial(cy) / \partial t$  corresponde al cambio en el almacenamiento de los sedimentos con el tiempo. Los parámetros de erosión  $q_s$ ,  $D_r$  y  $D_i$  son medidos por unidad de ancho del canal.

Para flujos someros y gradualmente variados el término  $\rho_s \partial(cy) / \partial t$  puede despreciarse, dando como resultado la ecuación de continuidad más ampliamente utilizada para flujos permanentes:

$$\frac{dq_s}{dx} = D_r + D_i \quad (2.6)$$

### 2.3.1 Interacción entre la carga de sedimentos y la capacidad de transporte

La interacción entre la carga de sedimentos y la capacidad de transporte es una consideración importante en la modelación del término  $D_r$ . Foster y Meyer (1975) propusieron que el desprendimiento y el depósito en surcos son proporcionales a la diferencia entre la capacidad de transporte y la carga de sedimentos:

$$D_r = \alpha_1(T_c - q_s) \quad (2.7)$$

donde  $\alpha_1$  es el coeficiente de reacción de primer orden; y  $T_c$  corresponde a la capacidad de transporte de los sedimentos [ $ML^{-1}T^{-1}$ ].

$\alpha_1$  está en función del tamaño de sedimentos y de la velocidad de sedimentación. Foster (1982) propone que: para flujos sobre el terreno  $\alpha_1 = V_s / 2q$ , y para flujos concentrados  $\alpha_1 = V_s / q$ , donde  $V_s$  es la velocidad de sedimentación de las partículas y  $q$  es la descarga unitaria.

Asumiendo que la capacidad de desprendimiento máxima ( $D_{rc}$ ) es proporcional a la capacidad de transporte, se tiene que:

$$D_{rc} = C_1 T_c \quad (2.8)$$

De esta manera queda la interacción entre la carga de sedimentos y la capacidad de transporte definida como (Foster y Meyer, 1972):

$$\frac{D_r}{D_{rc}} + \frac{q_s}{T_c} = 1 \quad (2.9)$$

El término  $D_r/D_{rc}$  representa la cantidad relativa de energía utilizada en el desprendimiento de los sedimentos. Así, cuando  $D_r = D_{rc}$ , se presenta una capacidad de

desprendimiento alta, cuando  $D_r < D_{rc}$ , se tiene una capacidad baja.  $D_r/D_{rc} > 1$  no existe porque  $D_{rc} \geq D_r$ . Este término varía entre cero y la unidad.

El término  $q_s/T_c$  representa la cantidad relativa de energía utilizada en el transporte de sedimentos. De esta manera cuando  $q_s = T_c$  la energía utilizada en el transporte es alta, y cuando  $q_s < T_c$  la energía que se utiliza es menor. Este término también varía entre cero y la unidad.

La suma de los dos términos ( $D_r/D_{rc} + q_s/T_c$ ) es igual a la unidad del total de la energía relativa aprovechable. En la ecuación (2.7), podemos apreciar que el desprendimiento en surcos es igual a la capacidad máxima de desprendimiento cuando la carga de sedimentos es igual a cero; recíprocamente, la capacidad de desprendimiento disminuye conforme aumenta la capacidad de transporte.

### 2.3.2 Erosión en surcos

El desarrollo y evolución de los surcos son importantes en el proceso de erosión, los procesos principales son los siguientes:

**Desarrollo de la red de surcos:** La red o sistema de surcos se inicia sobre los suelos desnudos como resultado de los microrelieves cuando el flujo se concentra. En un principio, los canales tienen la tendencia de ser paralelos (Huang *et al.*, 1996), pero sobre los bordes de las intersecciones entre surcos se generan cambios de flujo, resultando el flujo de algunos canales en ángulos asociados con la pendiente dando lugar a la unión de surcos que forman un sistema dendrítico (Toy *et al.*, 2002).

**Densidad de surcos y sus efectos en la erosión:** La densidad de surcos se define como el número de surcos por unidad de ancho. Diversos estudios han demostrado que la densidad varía con respecto a varios factores, tales como: inclinación, longitud de la pendiente, textura del suelo, escurrimiento, entre otros (Gilley *et al.*, 1990). En suelos altamente erosionables, la densidad observada ha sido alta y los surcos tienen el mismo tamaño de

inicio a fin. Gilley *et al.* (1990) observaron que las longitudes cortas de pendiente, la densidad relativa de los surcos es más alta que en longitudes largas.

**Crecimiento y desarrollo de los surcos individuales:** El desarrollo y crecimiento de un surco individual está gobernado por el desprendimiento potencial del sedimento, la capacidad de transporte, la carga de sedimentos y la interacción entre ellos.

### 2.3.3 Corte o incisión del surco

Los esfuerzos cortantes a lo largo de las fronteras del flujo, conducirán a la incisión de las paredes de un canal siempre y cuando dichos esfuerzos excedan la fuerza tractiva o esfuerzo crítico del suelo. El porcentaje de suelo desprendido en los surcos debido a la incisión es proporcional al excedente de esfuerzo cortante con respecto a su valor crítico, esto es (Foster, 1982):

$$D_r = K(\tau - \tau_c)^\alpha \quad (2.10)$$

donde  $D_r$  es el desprendimiento del suelo en el surco [ $ML^{-2}T^{-1}$ ], es decir es la masa de suelo desprendida en la unidad de tiempo y por unidad de superficie;  $\tau$  es el esfuerzo hidráulico cortante en el lecho del surco [ $ML^{-1}T^{-2}$ ];  $\tau_c$  el esfuerzo crítico de corte necesario para las partículas de suelo [ $ML^{-1}T^{-2}$ ];  $K_r$  y  $\alpha$  son parámetros empíricos. La constante  $\alpha$  es cercana a la unidad ( $\alpha \approx 1$ ), y en tal caso  $K = K_r$  es denominado factor de erodabilidad del suelo en el surco [ $L^{-1}T$ ].

Si el desprendimiento es para el caso de un canal, es necesario conocer la distribución del esfuerzo a lo largo de las fronteras. El esfuerzo en el lecho del canal  $\tau$  para flujo uniforme, está dada por:

$$\tau = \gamma_w R_h S_o \quad (2.11)$$

donde  $\gamma_w$  es el peso específico del agua [ $ML^{-2}T^{-2}$ ];  $R_h$  el radio hidráulico [ $L$ ]; y  $S_o$  la pendiente del fondo del surco [ $LL^{-1}$ ].

Debido a que la distribución de los esfuerzos cortantes en el lecho del surco no es uniforme se usa un valor promedio de los mismos, el cual es considerado como desprendimiento potencial; sin embargo, esto puede resultar en errores significativos en la estimación del  $\tau_c$  (Foster, 1982).

#### **2.3.4 Geometría del surco**

La importancia de la forma del surco para el crecimiento y desarrollo de la erosión es generalmente un resultado de la distribución de los esfuerzos. Previo a alcanzar una sección no erosionable, la forma del surco puede ser aproximada como un rectángulo con un ancho dado como se muestra en la siguiente relación (Lane y Foster, 1983):

$$W = aQ^b \quad (2.12)$$

donde  $W$  es el ancho del canal [L];  $Q$  el caudal en el surco [ $L^3T^{-1}$ ]; y  $a$  y  $b$  son constantes.

#### **2.3.5 Esfuerzo crítico de corte**

La resistencia del suelo a los esfuerzos cortantes del flujo concentrado recibe el nombre de esfuerzo crítico de corte ( $\tau_c$ ), o también fuerza tractiva, este valor corresponde al valor de la recta de regresión cuando ésta cruza el eje de las abscisas; es decir, cuando se inicia el desprendimiento de suelo por efecto del flujo concentrado. Para suelos no cohesivos, el diagrama de Shields (Rivera, 2003) es el método más usado para describir la fuerza tractiva de las partículas individuales.

Para un sedimento no cohesivo, los granos individuales de sedimento yacen y permanecen en el fondo debido a su propio peso, y resisten el movimiento horizontal debido a la fricción con los granos adyacentes. De esta manera, la fuerza estabilizadora está asociada con el peso sumergido de los granos individuales. Considerando que a partir de un esfuerzo crítico de corte, el sedimento puede comenzar a moverse, el parámetro de Shields es una expresión que denota la situación donde el sedimento está a punto de ponerse en movimiento, justo donde la fuerza de arrastre es igual a la velocidad de fricción. De tal

manera que, el sedimento comienza a moverse cuando la velocidad de corte del flujo es mayor que la velocidad de corte crítica

Para materiales cohesivos, el esfuerzo crítico de corte ha sido relacionado con diversas propiedades del suelo, incluyendo la fuerza de corte, salinidad y contenido de humedad (Alberts *et al.*, 1989), así como el porcentaje de arcilla, tamaño medio de la partícula, porcentaje de dispersión, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, proporción de calcio – sodio e índice de plasticidad (Prosser y Rustomji, 2000).

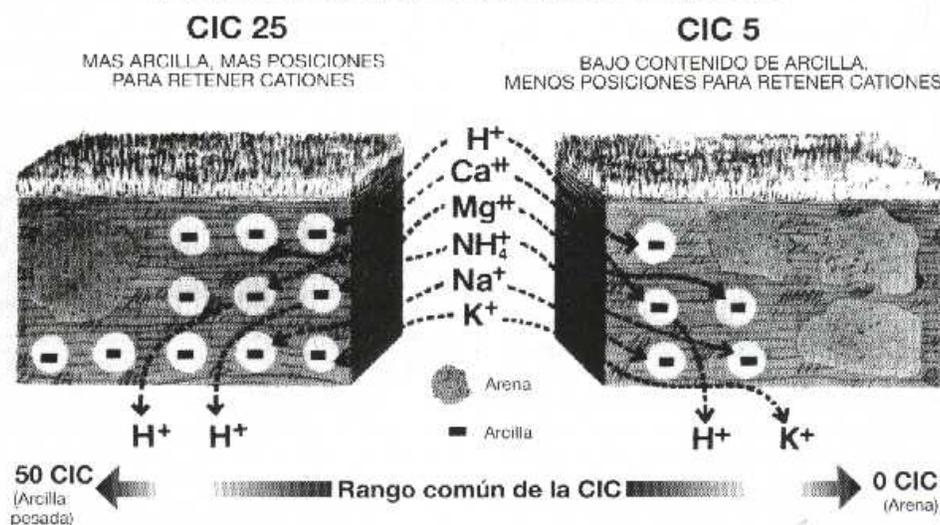
El rango típico de los esfuerzos críticos de corte para suelos agrícolas es de 1 a 3 Pa; sin embargo, Foster y Meyer (1975) recomendaron un valor promedio de 2.4 Pa. Por otra parte, Alberts *et al.* (1989) desarrollaron una ecuación de regresión usando una extensión del modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project) con datos de campo y encontraron que el esfuerzo crítico de corte para suelos agrícolas puede ser estimado en función de: la fracción fina de arenas, fracción del carbonato de calcio, proporción de adsorción de sodio, área específica de la superficie, fracción de arcilla dispersa en agua y fracción de arcilla. Para suelos agrícolas con una fracción de arcilla más grande de 0.30 mm, Alberts *et al.* (1989) encontraron que la fuerza tractiva del suelo puede ser predicha a partir del contenido volumétrico del agua. Se han desarrollado otras relaciones a partir de datos obtenidos del modelo WEPP (modelo de predicción hídrica) cuyos resultados son diferentes a la relación original.

## **2.4 EL USO DE YESO Y PAM PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN**

### **2.4.1 Características físicas y químicas del yeso y la PAM**

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es la capacidad que tiene el suelo de retener e intercambiar cationes. La fuerza de la carga positiva varía según cada catión, permitiendo que uno reemplace a otro en una partícula de suelo cargada negativamente. Los cationes, son los nutrientes, iones y moléculas cargados positivamente. Los principales cationes en el suelo son: calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), sodio (Na), hidrógeno (H) y amonio (NH<sub>4</sub>). Estos cationes se encuentran en el suelo, donde las partículas de arcilla son los constituyentes del suelo cargados negativamente. Tales partículas retienen y liberan nutrientes (cationes) cargados positivamente (cationes) (Figura 2.7). Las partículas de

materia orgánica también están cargadas negativamente y por lo mismo también atraen cationes. Las partículas de arena son inertes (sin carga) y no reaccionan, en consecuencia no representan problema alguno en el proceso.



**Figura 2.7.** Capacidad de Intercambio catiónico

Como consecuencia de ello, la aplicación de yeso mejora las características físicas de los suelos, substituyendo  $\text{Na}^+$  por  $\text{Ca}^{2+}$  en los coloides del suelo. El suelo de  $\text{Ca}^{2+}$  saturado es más estable y así más permeable que el suelo con una mayor saturación de  $\text{Na}^+$ . Lo anterior puede ser explicado mejor mediante la teoría llamada “la doble capa difusa”.

El modelo de la capa doble explica las fuerzas repulsivas entre los coloides. Está enfocada en el efecto que los coloides cargados negativamente tienen sobre los iones positivos en el seno de la solución. Los iones positivos forman una capa firmemente adherida alrededor de la superficie del coloide. Los iones positivos adicionales atraídos por las partículas negativamente cargadas confrontan una fuerza repulsiva de los contra-iones adheridos en la capa, y de los otros contra-iones aproximándose al coloide (Van Olphen, 1977).

La densidad de esta capa, conocida como la capa difusa, gradualmente disminuye con la distancia de la partícula coloidal, hasta que alcanza el equilibrio con el resto de los iones en la solución. Es la capa difusa rodeando al coloide la que crea la mayor fuerza repulsiva entre las partículas coloidales: a mayor densidad de la capa difusa, mayor será la distancia

en la que las fuerzas repulsivas son significativas. La función primordial de la capa doble es neutralizar al coloide negativamente cargado. Esto crea el potencial electrocinético entre la superficie del coloide y cualquier punto en el seno del líquido. Este potencial (típicamente en el orden de los milivolts) se conoce como Potencial Zeta. Cuando la densidad de carga superficial en las partículas coloidales es lo suficientemente baja, o cuando el contenido electrolítico de la solución es elevado, las fuerzas de Van der Waals logran sobre imponerse a las fuerzas de dispersión, y el resultado obtenido es el del proceso de floculación (Van Olphen, 1977).

Los suelos arcillosos generalmente contienen altos niveles de magnesio y sodio y poca materia orgánica. Esta condición es la causante de la compactación, reduciendo el aireamiento y el movimiento del agua. Estudios recientes han demostrado que la aplicación de yeso ( $\text{CaSO}_4$ ) sobre la superficie del terreno (Figura 2.8), ayuda a mejorar la aeración y penetración del agua en el suelo.



**Figura 2.8.** Yeso (Sulfato de calcio dihidratado)

Algunos de sus principales beneficios son (Ventura y Norton, 2000): a) reduce los niveles de sodio, provee sulfuro y calcio e incrementa la efectividad de los fertilizantes; b) promueve el crecimiento de las raíces dándole mayor vigor a las plantas; c) provee alimentos secundarios a las plantas (sulfuros y calcio); d) el yeso remueve el sodio de las partículas de arcilla y puede reducir el pH del suelo. Las raíces absorben los iones de calcio y los iones sulfuro ( $\text{SO}_4^-$ ) esto es debido a que se disuelven previamente en la solución del suelo y a la rapidez con que se mueve hacia las partes más profundas del suelo.

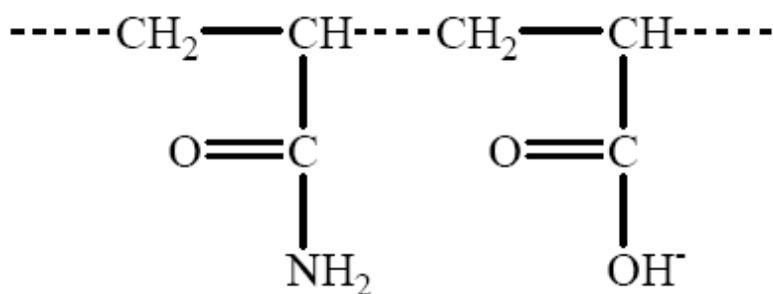
Cuando se aplica para lograr un pH óptimo, el yeso hace mucho más que solamente elevar el pH del suelo (Cochrane *et al.*, 2005):

- Reduce la toxicidad de aluminio y otros metales.
- Mejora las condiciones físicas del suelo, reduciendo la dispersión de arcillas y el sellamiento superficial.
- Mejora la permeabilidad de los suelos arcillosos
- Estimula la actividad microbiana en el suelo.
- Incrementa la CIC en suelos de carga variable.
- Incrementa la estabilidad de la materia orgánica del suelo.
- Incrementa la disponibilidad de varios nutrientes.
- Proporciona calcio y magnesio para las plantas.
- Mejora la fijación simbiótica de nitrógeno por parte de las leguminosas.
- Disminuye la toxicidad de metales pesados.

La Poliacrilamida se ha usado para acondicionamiento de los suelos desde 1950, sin embargo la expansión de su uso no fue sino hasta la década pasada (Green, 2001). Los acondicionadores de suelo han sido usados a lo largo de mucho tiempo para estabilizar los agregados del suelo; los polisacáridos naturales del suelo y los nuevos polímeros han sido estudiados extensamente y se conoce a detalle el funcionamiento de cada uno de ellos en el sistema del suelo (Shrestha *et al.*, 2006).

La poliacrilamida es un polímero soluble en agua con la capacidad de realzar la estabilización de suelo. Se agrupa en una clase de compuestos formados por la

polimerización de la acrilamida (Lentz *et al.*, 2001). La PAM pura es un homopolímero de unidades idénticas a la acrilamida. La poliacrilamida se puede formular con copolímeros para dar cargas específicas; el peso molecular se puede también manipular y se extiende generalmente entre algunos  $\text{mg mol}^{-1}$  a 20 gramos  $\text{mol}^{-1}$  (Lentz *et al.*, 2002). El aumento del peso molecular aumenta la longitud de la cadena del polímero y como consecuencia la viscosidad de la solución de PAM. La PAM actual que se usa en investigación como acondicionadores del suelo se centra en los polímeros aniónicos de alto peso molecular ( $10 - 20 \text{ mg mol}^{-1}$ ), cuya estructura se aprecia en la Figura 2.9.



**Figura 2.9. Estructura molecular de la poliacrilamida aniónica**

Las características iónicas de la PAM desempeñan un papel integral en su adsorción al suelo. Lentz (2003) sugiere que los polímeros no iónicos están unidos demasiado fuerte para formar interacciones beneficiosas del suelo. Asimismo, un polímero altamente aniónico tendría una cadena muy extendida, ya que los grupos negativos se rechazarían. Así, una carga aniónica media puede ser la mejor. Los términos altos y medio son relativos pero sugieren el mecanismo de comportamiento del polímero.

La disolución de la PAM en agua presenta algunas complicaciones, ya que la solución resultante es viscosa y dificulta su aplicación en campo mediante asperjado (Lentz, 2003). La PAM se degrada por luz del sol e interrupción mecánica (Shrestha *et al.*, 2006). Por lo tanto una sola aplicación es solamente una medida de control temporal de la erosión (Bjorneberg *et al.*, 2003).

#### 2.4.2 Uso de yeso y PAM para control de la erosión

Uno de los mecanismos principales que causan la erosión hídrica es la formación del sello superficial al momento que el suelo se expone a la acción de impacto de las gotas de lluvia y a los flujos concentrados en los surcos (Orts *et al.*, 2000). La formación del sello es el resultado de dos mecanismos complementarios (Shainberg y Levy, 1994; Jian Yu, 2003): a) la desintegración física de los agregados superficiales del suelo; y b) la dispersión fisicoquímica de las arcillas, que se mueven a capas más profundas del suelo mediante el agua infiltrada, bloquean los poros debajo de la superficie y forman una capa de permeabilidad baja llamada “zona de lavado” (Jian Yu, 2003).

El yeso ayuda a mejorar las características físicas de los suelos, substituyendo  $\text{Na}^+$  por  $\text{Ca}^{++}$  en los coloides del suelo, haciéndolo más estable y permeable.

Algunos de los resultados preliminares obtenidos indican que el yeso agrícola como fuente de electrolitos, aplicado sobre la superficie, es una forma eficiente y económica de controlar la degradación del suelo y mejorar sus características físicas (Ventura y Norton, 2002).

El mecanismo responsable de la reducción del escurrimiento y pérdida del suelo, y en consecuencia del incremento final de la infiltración con la aplicación de yeso, está relacionado con el incremento de electrolitos y la fuerza iónica de la PAM en la solución del suelo (Norton *et al.*, 1993; Santos *et al.*, 2000). Una fuerte concentración iónica de  $\text{Ca}^{2+}$  en la solución del suelo disminuye la dispersión de arcillas y ayuda a la floculación, de acuerdo con la teoría de la doble capa difusa (Van Olphen, 1977).

La doble capa difusa es comprimida hacia la superficie de arcilla cuando la concentración de electrolitos es aumentada y decrece la separación de las partículas de arcilla. Debido a la compresión de la doble capa, el rango de las fuerzas de repulsión se reduce considerablemente (Van Olphen, 1977), promoviendo así la floculación. De esta forma, el yeso provee electrolitos a la solución del suelo, disminuyendo la dispersión de arcillas y aumentando la fuerza del límite de desintegración de los agregados; estabilizando la

estructura de la superficie y manteniendo tasas mayores de infiltración, reduce el escurrimiento y la pérdida de suelo.

Por su parte, la aplicación de poliacrilamida controla la erosión causada por el flujo concentrado en sistemas de riego en surcos (Kornecki *et al.*, 2005), reduciendo significativamente el desprendimiento del suelo a causa del esfuerzo cortante hidráulico. Los frentes de humedecimiento son más amplios y la infiltración es mayor en los surcos tratados con poliacrilamida en comparación con los no tratados, lo que significa que potencialmente aumentarían la eficiencia en la aplicación y en el uso del agua.

Leib *et al.* (2005) encontraron que la PAM disuelta en el agua de riego en dosis de 10 kg ha<sup>-1</sup> ayuda a mejorar la infiltración del agua y mejorar notablemente la distribución del riego en el surco, pero en concentraciones < 20 mg l<sup>-1</sup> es eficaz en la disminución de la erosión (Lentz y Sojka, 2000). Sin embargo, las soluciones diluidas de PAM aplicadas en el riego por aspersión fueron menos eficaces en la prevención de la erosión comparada con el uso de PAM en la irrigación del surco.

Por otra parte, el uso del PAM en una dosis de 20 kg ha<sup>-1</sup> aumentó las tasas de infiltración al doble en suelos susceptibles a la erosión, especialmente con la presencia de electrólitos (Leib *et al.*, 2005). Por otro lado, Ajwa *et al.* (2006) encontraron que la adición de la PAM en la misma dosis produjo una infiltración final y acumulativa de 7 a 8 veces mayor en comparación con el control, observando que la erosión disminuyó por más de un orden de magnitud según tal comparación. Aplicado en los primeros 5 mm del suelo, con dosis de 20 kg ha<sup>-1</sup>, se reduce el escurrimiento -y en consecuencia la erosión del suelo- hasta en un 30% comparado con las parcelas de control (Jian Yu, 2003). Por ello, la conservación del suelo y del agua en suelos susceptibles a la erosión puede ser factible usando PAM en grano y mezclado con yeso en la superficie del suelo.

Ajwa *et al.* (2006) observaron que las tasas de infiltración en suelos tratados con PAM y yeso presentaron tasas de infiltración 10 veces más grandes que los suelos no tratados. Concluyeron que la eficacia de la PAM depende de tipo y de densidad de la carga así como peso molecular (ver también Green *et al.*, 2001).

El uso de PAM y yeso como práctica alternativa de conservación de suelos se ha probado en varias ocasiones como una herramienta eficaz y viable (Santos *et al.*, 2000; Lentz *et al.*, 2001; Yu *et al.*, 2003; Kornecki *et al.*, 2005; Shrestha *et al.*, 2006); sin embargo, los costos asociados al uso de PAM (en dosis de 20 kg ha<sup>-1</sup>) a un campo entero o el uso repetitivo, pueden no ser la manera más práctica de controlar la erosión inducida por la lluvia o por el riego mismo (Cochrane *et al.*, 2005).

Sin embargo, muchos estudios han demostrado que el uso correcto de PAM disminuye de 48 a 90% la pérdida de sedimentos en canales de riego (Lentz *et al.*, 2001) y puede incrementar hasta en un 54% la estabilidad de los agregados (Lentz *et al.*, 2001; Yu *et al.*, 2003; Shrestha *et al.*, 2006).

## **2.5 OBJETIVOS**

### **2.5.1 Generales**

- Evaluar el efecto de la aplicación de poliacrilamida para el control de la erosión en un sistema de riego en surcos.
- Evaluar el uso eficiente del agua en un sistema de riego en surcos con aplicación superficial de una mezcla de yeso y poliacrilamida.

### **2.5.2 Específicos**

- Evaluar la efectividad de tres formas de aplicación de PAM en un surco simulado en el control de la erosión y otras variables de flujo.
- Analizar el efecto de caudales crecientes de flujo en el proceso erosivo en un sistema de riego en surcos con y sin la aplicación de PAM.
- Cuantificar el uso eficiente del agua con aplicación de yeso y PAM en un sistema de riego en surcos usando el cultivo de avena.
- Determinar los parámetros del cultivo en respuesta al uso eficiente del agua para diferenciar los efectos de los tratamientos estudiados.
- Realizar un estudio comparativo entre la demanda evaporativa del tanque tipo A, la evapotranspiración potencial evaluada con un ET Gauge y el contenido de agua del cultivo evaluado bajo los tratamientos estudiados.

## **2.6 HIPÓTESIS**

- Independientemente de la forma de aplicación de PAM sobre el terreno, el polímero controla la erosión causada por el flujo concentrado en los surcos, al proporcionar mayor cohesión entre las partículas del suelo y aumentar los esfuerzos hidráulicos de corte.
- La aplicación combinada de yeso y poliacrilamida mejoran la eficiencia en el uso del agua en un sistema de riego por gravedad, debido a que cambian las propiedades físicas del suelo y reducen la evaporación causada por agrietamientos del proceso de secado del mismo.

### **3 METODOLOGIA**

El trabajo experimental fue desarrollado en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, que incluyen: módulo hidrológico, laboratorio e invernadero. El módulo hidrológico está localizado en las coordenadas 20° 35' 23.16" de latitud norte y 100° 24' 43.92" de longitud oeste a 1813 metros sobre el nivel del mar. El clima del sitio es templado semiseco, caracterizado por un verano cálido. La temperatura media anual es de 18°C. Los meses más calurosos son mayo y junio; alcanzando temperaturas máximas de 36°C, en tanto que los más fríos son los meses de diciembre y enero, en los que se registran temperaturas mínimas de -3° C. La precipitación pluvial anual promedio es de 555 mm (García, 1988). Los vientos predominantes son del Noroeste, Sur y Suroeste.

#### **3.1 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO**

El suelo es un sistema físico en el que coexisten tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida es la que rige el espacio ocupado por las otras dos, si bien la fase líquida desplaza a la gaseosa cuando el suelo está saturado y ésta ocupa el volumen total cuando el suelo está seco. En condiciones de coexistencia de ambas, el espacio poroso más grueso es ocupado por los gases mientras que el más fino constituye el dominio de los líquidos.

El suelo presenta propiedades físicas: textura, estructura, color, densidad aparente, porosidad, distribución de tamaño de poros, infiltración, permeabilidad, conductividad hidráulica y propiedades químicas: capacidad de intercambio de cationes, pH, y conductividad eléctrica.

Para fines de nuestro estudio, solamente se caracterizaron las siguientes propiedades: densidad aparente, conductividad hidráulica, curva de distribución de agregados y pH, las cuales se describen a continuación:

### 3.1.1 Densidad aparente

La densidad aparente ( $\rho_a$ ) es la relación entre la masa del suelo seco ( $M_s$ ) y el volumen del espacio ocupado por el suelo ( $V_t$ ); este volumen es igual a la suma de los volúmenes de los espacios ocupados por los sólidos y los poros del suelo:

$$\rho_a = \frac{M_s}{V_t} \quad (3.1)$$

Las unidades de la densidad aparente son [ $ML^{-3}$ ].

La determinación se realizó con el método del terrón y la parafina. Este método está basado en que la densidad aparente de los terrones o de las unidades estructurales del suelo, se pueden calcular a partir de su masa y su volumen. El volumen se determina mediante el recubrimiento del terrón con una sustancia impermeable al agua y pesándolo tanto al aire como sumergido en agua de densidad conocida, haciendo uso del principio de Arquímedes. El terrón o la unidad estructural de suelo, debe ser lo suficientemente estable para que no se destruya en su recubrimiento, pesada y manejo: de esta manera, la densidad aparente se calcula con la siguiente expresión:

$$\rho_a = \frac{M_s}{V_d - \frac{(S - M_s)}{\rho_p}} \quad (3.2)$$

donde  $\rho_a$  es la densidad aparente [ $g\text{cm}^{-3}$ ];  $\rho_p$  la densidad de la parafina [ $0.85 - 0.90\text{gcm}^{-3}$ ];  $M_s$  la masa del terrón seco;  $S$  la masa del terrón más parafina; y  $V_d$  el volumen desplazado por el terrón cubierto de parafina.

### 3.1.2 Ley de Darcy

La ley de Darcy establece que el caudal es proporcional al producto del área transversal al flujo y el gradiente hidráulico. El coeficiente de proporcionalidad es denominado conductividad hidráulica y denotado por  $K_s$  en un suelo saturado.

En términos matemáticos la ley de Darcy en el flujo unidimensional del agua se escribe de la manera siguiente:

$$Q = -K_s A \frac{\partial H}{\partial L} \quad (3.3)$$

donde  $Q$  es el caudal [ $\text{cm}^3\text{s}^{-1}$ ];  $K_s$  la conductividad hidráulica [ $\text{cms}^{-1}$ ];  $H$  la carga hidráulica;  $L$  la dirección del movimiento [ $\text{cm}$ ]; y  $A$  el área de la sección transversal a través de la cual fluye el agua [ $\text{cm}^2$ ].

La conductividad hidráulica expresa la facilidad con la que el suelo permite el flujo del agua. En este parámetro es determinante el tipo de suelo. La conductividad hidráulica representa el coeficiente  $K_s$  en la ley de Darcy:

La ecuación (3.1) muestra que el caudal del agua será más grande para valores de conductividad hidráulica mayores; también, si el gradiente hidráulico es mayor, el resultado se traduce en un mayor caudal.

La conductividad hidráulica saturada en suelos de baja permeabilidad (suelos arcillosos y limosos) puede ser estimada con el método del permeámetro de carga variable, diseñado y construido en el laboratorio de Hidráulica (Modelo PCV-QRO1), mismo que trabaja con muestras de suelo alteradas, previamente tamizadas por una malla de diámetro definido. Para mayor detalle del procedimiento ver Anexo 1. La fórmula correspondiente es la siguiente:

$$K_s = \left( \frac{h_2 - h_1}{t_2 - t_1} \right) \frac{L}{h_2} \quad (3.4)$$

donde los valores de  $h_1$  y  $h_2$  corresponden a la carga inicial y final de medición en los tiempos respectivos  $t_1$  y  $t_2$ , y  $L$  la longitud de la columna del suelo.

### **3.1.3 Curva de distribución de agregados**

Estudios cuidadosos han establecido el hecho de que la distribución del tamaño de los granos que constituyen los materiales, no es un proceso que haya tenido lugar al azar. Ha quedado claro que las gradaciones de estos materiales han sido determinadas por algunas de las características de los diversos procesos geológicos que han intervenido en su deposición.

La granulometría de los materiales se lleva a una gráfica, para obtener así una curva que muestra la distribución de los diversos tamaños de granos, desde finos a gruesos. Para poder comparar la gradación de una muestra con la de otra, se hace necesario ajustar a un procedimiento uniforme o estándar.

El equipo necesario para el análisis de las muestras está formado por:

- Un juego de mallas o tamices estándar, por lo general estos son de un diámetro de 20 centímetros (8") con malla de alambre.
- Una balanza de alta precisión para pesar las muestras.
- Un horno o plato para el secado de las muestras.

### **3.1.4 Determinación del potencial hidrógeno (pH)**

El valor del pH se determinó con potenciometría y colorimetría (utilizando un electrodo), mediante indicadores que cambian de color con la concentración del ión hidrógeno. Un electrodo de pH es un tubo lo suficientemente pequeño como para poder ser introducido en un tarro normal. Está unido a un pH-metro por medio de un cable. Un tipo especial de fluido se coloca dentro del electrodo; este es normalmente "cloruro de potasio 3M". Algunos electrodos contienen un gel que tiene las mismas propiedades que el fluido 3M. En el fluido hay cables de plata y platino.

El sistema es bastante frágil, porque contiene una pequeña membrana. Los iones  $H^+$  y  $OH^-$  entrarán al electrodo a través de esta membrana, creando una carga ligeramente positiva y ligeramente negativa en cada extremo del electrodo. El potencial de las cargas determina el número de iones  $H^+$  y  $OH^-$  y cuando esto haya sido determinado el pH aparecerá digitalmente en el pH-metro. El potencial depende de la temperatura de la solución. Es por eso que el pH-metro también muestra la temperatura.

Los resultados que se obtienen varían de 4.0 a 8.5 para la mayoría de los suelos, sin que esto quiera decir que en casos especiales puedan encontrarse valores menores o mayores según sea el caso.

Con frecuencia se ha dicho que un pH de 6.5 es ideal para la mayoría de los cultivos, porque presenta el mejor acomodo en lo que concierne al efecto del pH sobre la disponibilidad de nutrientes. En realidad el mejor pH para un cultivo particular, que también crece en un tipo particular de suelo, depende de muchos factores, entre los cuales se tienen: las necesidades de cultivo, las características del suelo y contenido de sales de la solución agua-suelo.

El pH es un factor logarítmico; cuando una solución se vuelve diez veces más ácida, el pH disminuirá en una unidad. Cuando una solución se vuelve cien veces más ácida, el pH disminuirá en dos unidades.

## **3.2 INSTRUMENTACIÓN PARA MEDIR EL EFECTO DE LA POLIACRILAMIDA EN LA EROSIÓN EN SURCOS.**

### **3.2.1 Surco simulado**

Para estudiar el efecto de la PAM en el control de la erosión se utilizó un surco simulado construido con tubería de PVC clase 14, cortado a la mitad. Las dimensiones del canal circular de media circunferencia formado fueron: 0.30 m de ancho x 0.25 m de profundidad al centro y 6 m de longitud. En el cual fue colocado el suelo y acomodado a una profundidad de 0.20 m al centro, con una densidad aparente similar a la observada en terrenos agrícolas. La pendiente dada al canal fue de 3%, común en terrenos de riego,

misma que se logró mediante tres soportes colocados en los extremos del canal y al centro del mismo (Figura 3.1).



**Figura 3.1.** Canal para medir erosión

El suelo usado para este fin es un suelo representativo de la región del Bajío y de acuerdo con la clasificación FAO (FAO-UNESCO, 1988), es un Vertisol Pélico, común en zonas de climas templados, cálidos y semisecos o en aquellas zonas donde las estaciones de sequía y lluvia están muy marcadas. Sus principales características es que son suelos de textura arcillosa, frecuentemente de color negro o gris, representativos de la zona centro y oriente de México (es el caso de la zona del Bajío y del Estado de Querétaro) y de color café ó café-rojo en el Norte. Son pegajosos cuando están húmedos y muy duros cuando están secos. Su utilización agrícola es extensa, variada y productiva. Son siempre muy fértiles pero presentan ciertos problemas de inundación y drenaje (INEGI, 1989).

### 3.2.2 Abastecimiento de agua

El caudal fue proporcionado al sistema por un tanque de carga constante de 60 litros, colocado a 2 m del nivel de referencia, y suministrada por una bomba de  $\frac{3}{4}$  HP conectada a un tanque con capacidad de 1000 litros (Figura 3.2.a). La entrada de agua al surco fue regulada por una válvula de mariposa y un caudalímetro, aplicando un caudal inicial de 75 litros por hora (lph), el segundo caudal aplicado fue de 100 lph, posteriormente los incrementos fueron de 50 litros hasta llegar al caudal máximo de 250 lph (Figura 3.2.b)



a)



b)

**Figura 3.2.** Sistema de abastecimiento de agua: a) tanque de carga constante, b) caudalímetro

### 3.2.3 Tratamientos aplicados

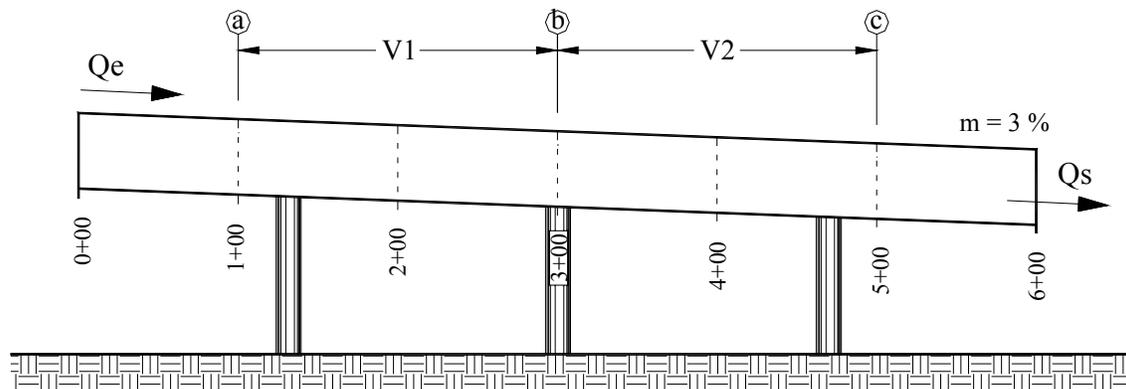
Se aplicaron tres tratamientos de PAM sobre el terreno a una dosis de  $20 \text{ kg ha}^{-1}$ , mismos que fueron comparadas con las mediciones realizadas en un surco de referencia sin aditivos. Los tratamientos de PAM aplicados son:

- PAM granular aplicada al voleo sobre el terreno
- PAM diluida previamente en agua y asperjada sobre el terreno
- PAM diluida previamente en agua e inyectada con el caudal inicial

### 3.2.4 Medición de variables

Para el análisis del desprendimiento de suelos  $D_r$ , esfuerzos críticos de corte  $\tau_c$ , así como los esfuerzos de corte  $\tau$ , se midieron parámetros de flujo tales como velocidad y ancho de la superficie libre del agua, mismos que sirvieron para determinar las áreas de flujo, perímetros de mojado, radios hidráulicos, y otros parámetros necesarios para conocer la cantidad de desprendimiento y fuerzas actuantes sobre el surco.

Para facilitar estas mediciones, el surco fue dividido en tres partes: la primera comprendió el primer metro del canal, la segunda del primer metro de hasta los tres metros, y la tercera abarca de los tres metros a los 5 metros de distancia pendiente abajo (Figura 3.3). También se colocó un vertedor al final del surco con la finalidad de coleccionar las muestras de escurrimiento y sedimento para su evaluación en el laboratorio.

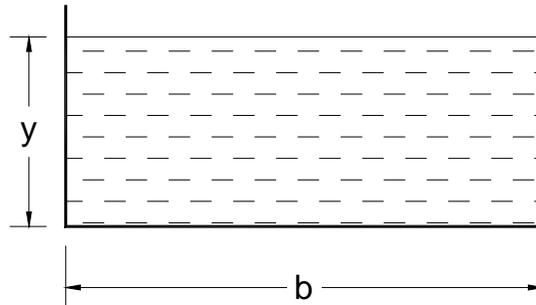


**Figura 3.3.** Esquema de los puntos de medición en el canal (Acotaciones en m)

Los parámetros de velocidad y ancho de surco fueron medidos tres veces directamente en el surco, y para los cálculos se tomaron los promedios en cada uno de los caudales cuantificados. Los límites de estas tres secciones corresponden a los sitios puntuales donde fueron realizadas las mediciones, las cuales fueron:

- Velocidad del agua (V1 y V2)
- Ancho del surco, medido en los punto a, b y c.

En la presente investigación se asume que la forma del canal es rectangular (Figura 3.4), basado en que la erosión progresiva del flujo antes de alcanzar una capa de suelo no erosionable adopta esta forma (Lane y Foster, 1983).



**Figura 3.4.** Parámetros de flujo en secciones rectangulares

De esta forma algunos de los cálculos proceden de la siguiente manera:

$$A = by \tag{3.5}$$

$$P = b + 2y \tag{3.6}$$

$$R_h = \frac{A}{P} = \frac{by}{b + 2y} \tag{3.7}$$

donde  $y$  es el tirante de agua en el canal [m];  $A$  es el área de la sección del flujo [m<sup>2</sup>];  $P$  es el perímetro de mojado [m] y  $R_h$  es el radio hidráulico.

El cálculo del la profundidad de flujo se realizó a partir de la ecuación de continuidad:

$$Q = Av \tag{3.8}$$

$$A = by \tag{3.9}$$

Sustituyendo la ecuación (3.9) en la ecuación (3.8) tenemos lo siguiente:

$$Q = v(by) \tag{3.10}$$

Finalmente:

$$y = \frac{Q}{bv} \quad (3.11)$$

### 3.2.5 Cálculo de la tasa de desprendimiento $D_r$ y esfuerzo crítico de corte $\tau_c$

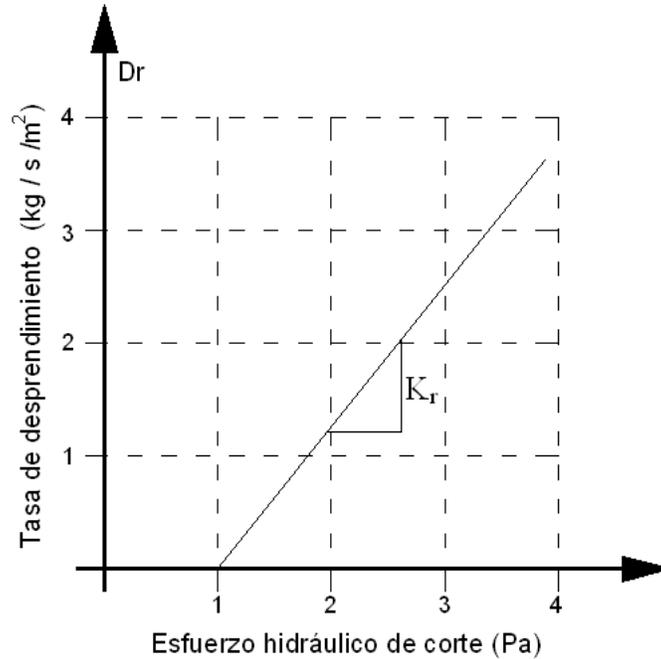
El cálculo de la tasa de desprendimiento  $D_r$ , se realizó con la cantidad de sedimentos captados en los recipientes en cada uno de las mediciones realizadas en los diferentes tratamientos, en un tiempo y para un área de surco conocido, expresándose como  $D_r$  [ $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ]. El cálculo de los esfuerzos cortantes [Pa] se realizó con la ecuación (2.11), donde se tomó un peso específico  $\gamma_w = 9879 \text{ N m}^{-3}$ , asumiendo una temperatura de  $20^\circ\text{C}$ .

Se asume una relación lineal entre el desprendimiento y el esfuerzo cortante del lecho del canal. La ecuación (2.10) se transforma en:

$$D_r = K_r(\tau - \tau_c) \quad (3.12)$$

donde  $K_r$  es el factor de erodabilidad del suelo [ $\text{m}^{-1}\text{s}$ ] y  $\tau_c$  el esfuerzo crítico de corte.

El valor del esfuerzo crítico de corte  $\tau_c$  corresponde al punto donde se intersecta la recta de regresión con el eje de las abscisas. Interpretándose como la esfuerzo mínimo de corte de flujo para iniciar el desprendimiento de las partículas. Estos parámetros se muestran con más detalle en la Figura 3.5.



**Figura 3.5.** Gráfica de los parámetros de cálculo en la erosión en surcos

### 3.2.6 Medición de la erosión del suelo

Para cuantificar la erosión se utilizó el método gravimétrico. La toma de la muestra consistió en usar depósitos de 1 litro y con un cronómetro se tomó el tiempo de llenado del recipiente. Las cantidades de suelo erosionado fueron variando dependiendo del caudal de entrada de agua y de los métodos aplicados para combatir la erosión, con la muestra colectada se procedió a lo siguiente:

Paso 1: Se trasladan al laboratorio donde se pesan en una balanza de precisión.

Paso 2: Se añaden alrededor de 10 ml de floculante (Sulfato de Aluminio saturado) para decantar el agua.

Paso 3: La muestra con sedimentos se lleva al horno para su secado a 105°C hasta obtener peso constante.

Paso 4: Se obtiene el peso de los sedimentos contenidos en la muestra.

### 3.3 EXPERIMENTO PARA EVALUAR EL USO EFICIENTE DEL AGUA

Para evaluar el uso eficiente del agua se sembró avena en 2 parcelas tipo USLE de 5 m de longitud, 2 m de ancho y pendiente del 6%. La preparación del terreno se hizo simulando un barbecho, el cual consistió en remover el suelo a una profundidad de 20 cm para posteriormente proceder a nivelarlas.

La avena (*Avena sativa*) se sembró a una densidad de  $120 \text{ kg ha}^{-1}$ , con espaciamiento entre surcos de 20 cm. La parcela tratada se fertilizó con una mezcla de Clean Star (N-P-K), Kick Off (N-P-K) y Grozyme con dosis de  $40 \text{ l ha}^{-1}$ , sulfato de calcio di-hidratado a una dosis de  $5 \text{ t ha}^{-1}$  y poliacrilamida con tasa de  $20 \text{ kg ha}^{-1}$ ; mismos se aplicaron superficialmente al término de la siembra por voleo (Figura 3.6).



**Figura 3.6.** Parcelas control (izquierda) y tratada (derecha)

Se utilizó un método de riego por gravedad (compuertas), mismo que se muestra en la Figura 3.7.



**Figura 3.7.** Aplicación del riego por compuertas

Las mediciones realizadas durante la etapa fenológica del cultivo son las siguientes:

### **3.3.1 Presión del agua en el suelo y contenido de humedad**

Para monitorear la presión del agua en el suelo se instalaron tres sensores en cada una de las parcelas. Los sensores utilizados son del tipo WaterMark (Figura 3.8) y tienen un funcionamiento similar al de un tensiómetro. Es decir se tiene que obtener la curva de retención de agua del suelo para estimar el contenido de humedad a partir de la lectura de la presión.



**Figura 3.8.** Sensores WaterMark

La calibración de los sensores se realizó de la siguiente manera, mostrando los pasos más importantes en la Figura 3.9:

*Paso 1:* Los sensores fueron sometidos a un humedecimiento y secado por un periodo de 48 horas -en la cual 11 horas estaban dentro de un recipiente de agua y 1 hora a temperatura ambiente- repitiéndose este proceso hasta que no quedaran burbujas de aire atrapadas en el sensor.

*Paso 2:* Se colocaron en macetas de plástico con 3 tratamientos (PAM, yeso, yeso + PAM y control), agregando agua hasta que el suelo estuviera completamente saturado.



**Paso 1**



**Paso 2**



**Paso 3**



**Paso 4**

**Figura 3.9.** Proceso de calibración de sensores WaterMark

*Paso 3:* Se tomaron lecturas diarias de peso inicial de la maceta + suelo + sensor + agua, y lecturas de la presión del agua ( $\psi$ ), hasta que el sensor registrara un valor de 199 cb (el cual indica que el suelo está casi seco).

*Paso 4:* Una vez terminado con esto, se procedió a pesar por separado el sensor, la maceta y el suelo, este último se secó al horno a  $105^\circ$  por un periodo de 48 horas.

*Paso 5:* Con los datos obtenidos se calculó, en cada una de las macetas, el contenido gravimétrico de humedad del suelo [ $g\ g^{-1}$ ], con la siguiente fórmula:

$$\omega = \frac{M_w}{M_s} = \frac{M_{sh} - M_s}{M_s} \quad (3.13)$$

donde  $\omega$  es el contenido gravimétrico de humedad,  $M_w$  es la masa del agua contenida en el suelo,  $M_s$  es la masa de suelo seco, obtenida después de secar el suelo en un horno a  $105^\circ C$ ; y  $M_{sh}$  es la masa de suelo húmedo.

El contenido volumétrico de humedad ( $\theta$ ) [ $cm^3\ cm^{-3}$ ] se obtiene a partir de  $\omega$  mediante:

$$\theta = \frac{\rho_a}{\rho_w} \omega \quad (3.14)$$

donde  $\rho_a$  es la densidad aparente del suelo (seco) y  $\rho_w$  es la densidad del agua.

*Paso 6:* Con los datos obtenidos, la curva de retención resultante puede ser bien descrita por la ecuación de van Genuchten (1980):

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[ 1 + \left( \frac{\psi}{\psi_d} \right)^n \right]^m} \quad (3.15)$$

donde  $\theta$  es el contenido volumétrico de humedad en función de la presión del agua en el suelo ( $\psi$ );  $\theta_s$  y  $\theta_r$  son los contenidos de humedad a saturación y residual,

respectivamente;  $\psi_d$  es un valor característico de la presión;  $m$  y  $n$  son parámetros de forma de la curva, adimensionales y positivos.

La ecuación (3.15) contiene dos parámetros de forma  $\{m, n\}$ . Van Genuchten (1980) ha mostrado que con la ecuación (3.15) pueden ser obtenidas formas cerradas de la curva de conductividad hidráulica a partir de algunos modelos capilares, si se acepta una relación entre los parámetros de forma. Con un parámetro de forma  $\{m\}$ , la ecuación (3.15) sigue representando con buena calidad la curva experimental de retención de humedad.

Aceptando esta idea pueden ser obtenidas formas cerradas de la conductividad a partir de los modelos capilares basados en los conceptos de la Geometría Fractal presentados por Fuentes *et al.* (2003). En este trabajo se retiene el modelo denominado del poro grande, recomendado por Antonino *et al.* (2005), y es el siguiente:

$$\frac{K(\Theta)}{K_s} = \int_0^{\Theta} \frac{\vartheta^{2s-1}}{|\psi(\vartheta)|^{4s}} d\vartheta \bigg/ \int_0^1 \frac{\vartheta^{2s-1}}{|\psi(\vartheta)|^{4s}} d\vartheta \quad ; \quad \Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3.16)$$

donde  $\Theta$  es el grado efectivo de saturación y  $\vartheta$  es una variable de integración.

El parámetro  $s$  es una dimensión fractal relativa definida por  $s = D/E$ , donde  $D$  es la dimensión fractal de la superficie de los sólidos y  $E = 3$  es la dimensión de Euclides del espacio físico. La dimensión fractal relativa está relacionada con la porosidad volumétrica total del suelo ( $\phi$ ) a través de:

$$(1 - \phi)^s + \phi^{2s} = 1 \quad (3.17)$$

La porosidad es estimada con la ecuación clásica siguiente:

$$\phi = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \quad (3.18)$$

donde  $\rho_a$  es la densidad aparente del suelo (seco) y  $\rho_s$  es la densidad de las partículas.

La introducción de la ecuación (3.15) en la ecuación (3.16), aceptando la relación entre  $m$  y  $n$  indicada enseguida, proporciona la siguiente forma cerrada de la conductividad hidráulica:

$$K(\theta) = K_s \left[ 1 - \left( 1 - \theta^{1/m} \right)^{2sm} \right] \quad ; \quad 0 < 2sm = 1 - 4s/n < 1 \quad (3.19)$$

El contenido de humedad residual ( $\theta_r$ ) es generalmente asumido igual a cero (Antonino *et al.*, 2005); el contenido de humedad a saturación natural ( $\theta_s$ ) se toma igual al valor de la humedad donde la presión tiende a cero.

La obtención de los parámetros desconocidos restantes  $\{m, \psi_d\}$  son estimados mediante el criterio de mínimos cuadrados, de modo de minimizar la suma de los cuadrados del error (SCE) definida por:

$$SCE(m, \psi_d) = \sum_{i=1}^{N_{obs}} [\theta_i - \hat{\theta}(\psi_i; m, \psi_d)]^2 \quad (3.20)$$

donde  $\theta_i$  y  $\hat{\theta}(\psi_i; m, \psi_d)$  son respectivamente los contenidos de humedad observado y calculado con la ecuación (3.15), asociados a la presión  $\psi_i$ ;  $i=1, 2, \dots, N_{obs}$  y  $N_{obs}$  es el número de observaciones.

La raíz del error cuadrático medio asociado a la ecuación (3.15), se calcula con:

$$RECM = \sqrt{\frac{1}{N_{obs} - 1} \sum_{i=1}^{N_{obs}} [\theta_i - \hat{\theta}(\psi_i; m, \psi_d)]^2} \quad (3.21)$$

donde se toma  $\{m, \psi_d\}$  como aquellos valores que minimizan la suma de los cuadrados de los errores definida por la ecuación (3.20).

Puesto que RECM tiene las unidades del contenido de humedad, es más conveniente utilizar el índice definido por:

$$\langle \Delta \Theta \rangle = \frac{\text{RECM}}{\theta_s - \theta_r} \quad (3.22)$$

que representa la raíz del error cuadrático medio del grado efectivo de saturación (Antonino *et al.*, 2005).

### 3.3.2 Parámetros del cultivo

Los parámetros de la planta como la altura y el contenido de clorofila fueron medidos semanalmente y cada quince días respectivamente. El primero se realizó en 10 plantas escogidas aleatoriamente, en cada una de las parcelas; mientras que para el segundo se utilizaron 30 plantas utilizando un medidor de clorofila (CHLOROPHYLL METER SPAD-502) (Figura 3.10).



**Figura 3.10.** Medidor de clorofila SPAD-502

La clorofila tiene picos de absorbancia en las regiones del azul (400-500nm) y el rojo (600-700nm) con casi ninguna transmitancia en la región de infrarrojos. El SPAD-502 determina el contenido relativo de clorofila presente en las hojas, midiendo la absorbancia en dos regiones de longitud de onda diferentes (rojo y cerca del infrarrojo). Utilizando estas dos transmitancias, el medidor calcula un valor SPAD numérico que es proporcional al contenido de clorofila en la planta.

### 3.3.3 Parámetros del clima

Las variables climáticas se evaluaron con una estación climatológica localizada dentro del módulo hidrológico, con mediciones a intervalos de 5 minutos (Figura 3.11). Las variables medidas fueron: temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento, presión barométrica. La evaporación se midió diariamente con un tanque evaporímetro tipo A (Figura 3.12a) y, la evapotranspiración fue medida con ET Gauge modelo A (Figura 3.12b).



**Figura 3.11.** Estación climatológica



**a)**



**b)**

**Figura 3.12.** a) Tanque evaporímetro tipo A y b) Etgauge modelo A.

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

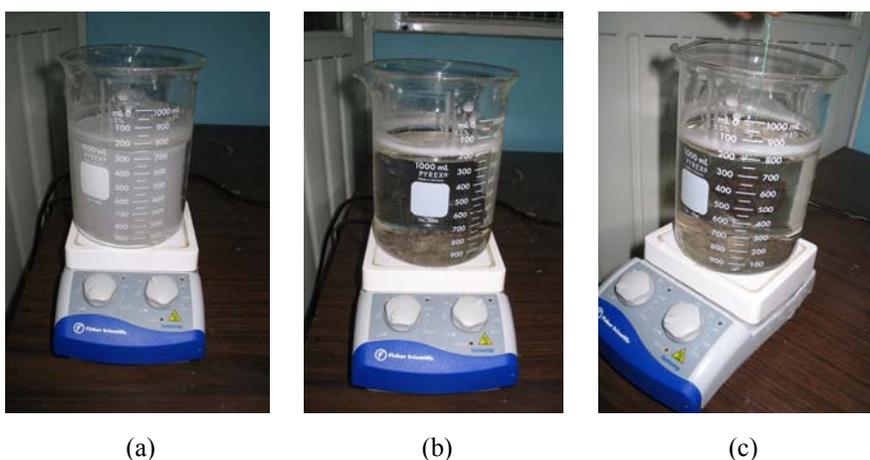
#### 4.1.1 Densidad aparente

Para obtener un valor confiable de esta densidad, se realizaron tres repeticiones -tomando un valor de la densidad de la parafina de  $0.85 \text{ g cm}^{-3}$ - dando como resultado los datos mostrados en el cuadro 4.1.

**Cuadro 4.1. Cálculo de la Densidad aparente**

	Repeticiones			Unidades
	1	2	3	
<b>Peso del suelo seco</b>	25.87	29.40	31.55	g
<b>Peso del terrón mas la parafina</b>	52.12	60.41	55.81	g
<b>Volumen desplazado</b>	51.00	59.00	53.00	MI
<b>Densidad de la parafina:</b>	0.85	0.85	0.85	
Densidad:	1.29	1.31	1.29	<b><math>\text{g cm}^{-3}</math></b>

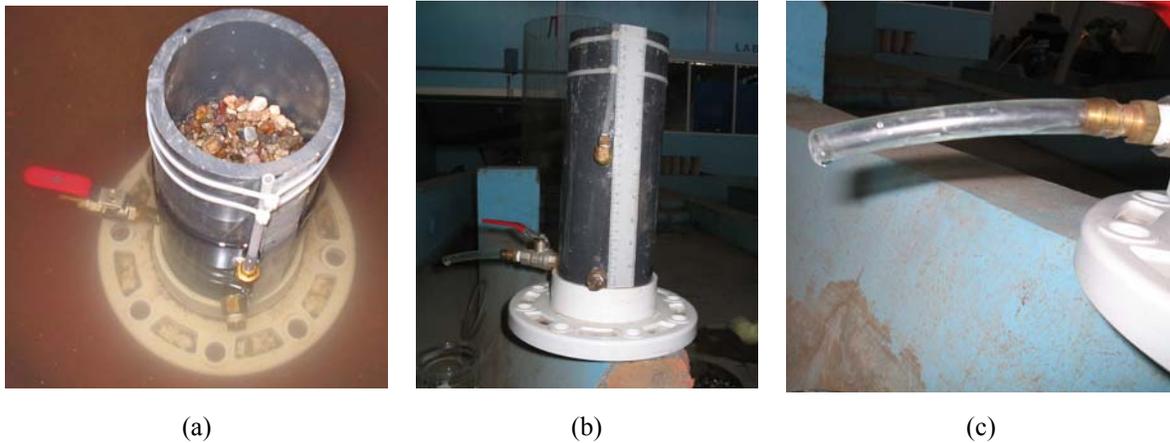
La densidad aparente promedio obtenida es de  $1.29 \text{ g cm}^{-3}$ , que de acuerdo con Assouline y Ben-Hur (2003) este valor es típico de los suelos vertisoles en condiciones de manejo agrícola y pastoreo. La comparación de medias prueba que nos hay diferencia entre los resultados obtenidos ( $p < 0.0001$ ) con un intervalo de confianza de 95%. La desviación estándar es de 0.067 g. El proceso se muestra de manera general en la Figura 4.1.



**Figura 4.1.** Derretimiento de la parafina (a y b); e introducción del terrón (c).

### 4.1.2 Conductividad hidráulica

Se realizaron tres repeticiones del proceso y cada repetición con tres cargas, el método de obtención de este parámetro se muestra a grandes rasgos en la Figura 4.2.



**Figura 4.2.** Proceso de obtención de la conductividad hidráulica: saturación de la muestra de suelo (a); y medición de la carga a distintos intervalos de tiempo (b y c).

La conductividad hidráulica saturada media obtenida fue de  $0.3 \text{ cm h}^{-1}$ . Sin embargo, debido a la naturaleza hinchable-agrietable de los vertisoles puede inducir grandes variaciones en este parámetro. En períodos de bajas precipitaciones las arcillas expansivas se contraen, formando un complejo sistema de grietas y macroporos. Al inicio del riego o de las precipitaciones, los valores de  $K_s$  se asemejan a los medidos en suelos arenosos. Por otra parte, al encontrarse muy húmedos los valores de  $K_s$  disminuyen sensiblemente (Díaz *et al.*, 2003).

### 4.1.3 Curva de distribución de agregados del suelo

Los pasos generales para obtener la curva de distribución de agregados del suelo se muestran en la Figura 4.3. Se tomó una muestra de 500 g del suelo (a), se seleccionó un juego de tamices que (b), el suelo se colocó en los tamices, mismos que fueron sometidos a un proceso de vibración (c); al término del proceso de vibración, el suelo retenido en cada uno de los tamices se pesó nuevamente (d), para colocarlos en el agua (e) y obtener la distribución de agregados en húmedo (f). Al final las fracciones retenidas se secaron al

horno a 105°C, hasta obtener peso constante y se pesaron nuevamente para obtener la curva de distribución, misma que se muestra en la Figura 4.4.



Figura 4.3. Proceso de obtención de la curva de distribución de agregados.

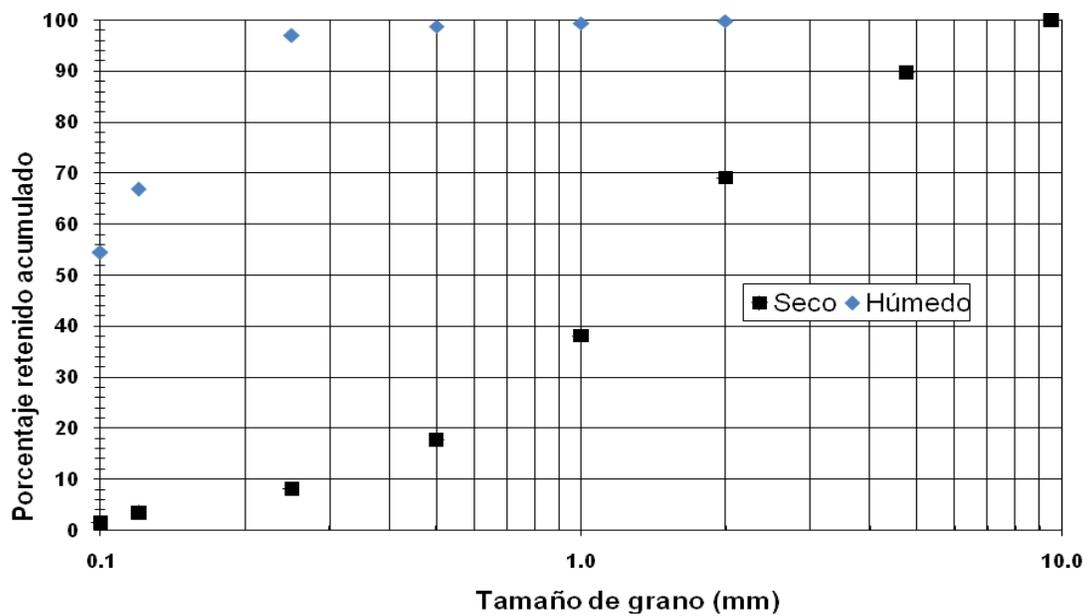


Figura 4.4. Curva de distribución de agregados en seco y en húmedo

La curva granulométrica muestra qué material es más grande o más pequeño que una partícula de determinado tamaño. En este caso, se observa que aproximadamente el 40% de la muestra en seco está constituida por granos menores de 1 mm, mientras que para el análisis en húmedo, mas del 98% es menor a 0.3 mm. Con esto, podemos decir que el suelo en estudio al someterse al proceso de secado se agrupa en conglomerados formando terrones mayores a 2 mm, y cuando se somete al proceso de humedecimiento, los terrones se disgregan y las partículas de arcilla se suspenden y precipitan.

Con los datos generados a partir del tamizado en seco se determinó el diámetro medio ponderado (DMP), de acuerdo con Eynard *et al.* (2004) se calcula con:

$$DMP = \sum_{i=1}^n D_i F_i \quad (4.1)$$

donde DMP es el diámetro medio ponderado (mm);  $D_i$  el diámetro medio de la clase (mm); y  $F_i$  es el peso parcial de cada fracción con respecto al peso total de la muestra. El proceso de cálculo se presenta en los cuadros 4.2 y 4.3.

**Cuadro 4.2. Cálculo del diámetro medio ponderado en seco**

Malla (mm)	Suelo retenido	Fracción	Acumulado	
$D_i$	g	$F_i$	$D_i F_i$	
9.520	42.810	0.085	0.812	0.085
4.760	88.980	0.177	0.844	0.263
2.000	151.450	0.302	0.604	0.565
1.000	112.668	0.225	0.225	0.789
0.500	57.490	0.115	0.057	0.904
0.250	30.850	0.061	0.015	0.965
0.120	9.070	0.018	0.002	0.983
0.000	8.430	0.017	0.812	1.000
		0		
	$\Sigma = 501.75$	1.000		$DMP_s = 2.559$

**Cuadro 4.3. Cálculo del diámetro medio ponderado en húmedo**

Malla (mm)	Suelo retenido g	Fracción $F_i$	Acumulado	
$D_i$			$D_i F_i$	
9.520	0.000	0.000	0.000	0.000
4.760	0.020	0.000	0.000	0.000
2.000	0.590	0.001	0.002	0.001
1.000	3.278	0.007	0.007	0.008
0.500	18.000	0.036	0.018	0.044
0.250	272.350	0.543	0.136	0.586
0.120	44.760	0.089	0.011	0.676
$\Sigma = 338.998$			$DMP_h = 0.173$	

El índice de estabilidad estructural se calcula con:

$$IES = \frac{DMP_h}{DMP_s} \quad (4.2)$$

donde  $DMP_h$  es el diámetro medio ponderado en húmedo y  $DMP_s$  es el diámetro medio ponderado en seco.

De esta manera se tiene que el  $DMP_s$  es 2.559 mm mientras que el  $DMP_h$  es de 0.173 mm. Estos valores muestran que los agregados del suelo se disgregan en partículas menores a 1 mm de diámetro al entrar en contacto con el agua, dando como resultado un suelo inestable:  $IES = 0.068$ .

#### 4.1.4 Determinación del pH

Se realizaron tres repeticiones del procedimiento y el valor promedio obtenido fue de 7.0, mismo que nos indica que tiene un pH neutro, apto para el desarrollo del cultivo, de otra manera, el número de protones (iones  $H^+$ ) es igual al número de iones hidroxilo ( $OH^-$ ). Este valor no es constante en los suelos, incluso de un mismo suelo, suele variar de una región a otra. Por lo que se recomienda tomar con cautela el valor obtenido en el presente estudio. En la Figura 4.5 se muestran los materiales empleados para este análisis.



**Figura 4.5.** Materiales para el cálculo del pH.

## 4.2 EROSIÓN EN SURCOS

En el Cuadro 4.4 se muestran los parámetros obtenidos mediante el ajuste por el método de mínimos cuadrados de la ecuación (3.12) a los datos experimentales del desprendimiento y el esfuerzo cortante, es decir: el factor de erodabilidad en el surco  $K_r$ , el esfuerzo crítico de corte  $\tau_c$ , el coeficiente de determinación  $r^2$ , así como el valor de la tasa de desprendimiento del suelo en el surco  $D_r$  correspondiente al caudal máximo aplicado de 250 lph.

**Cuadro 4.4. Resumen de resultados obtenidos de la aplicación de PAM. Ecuación lineal.**

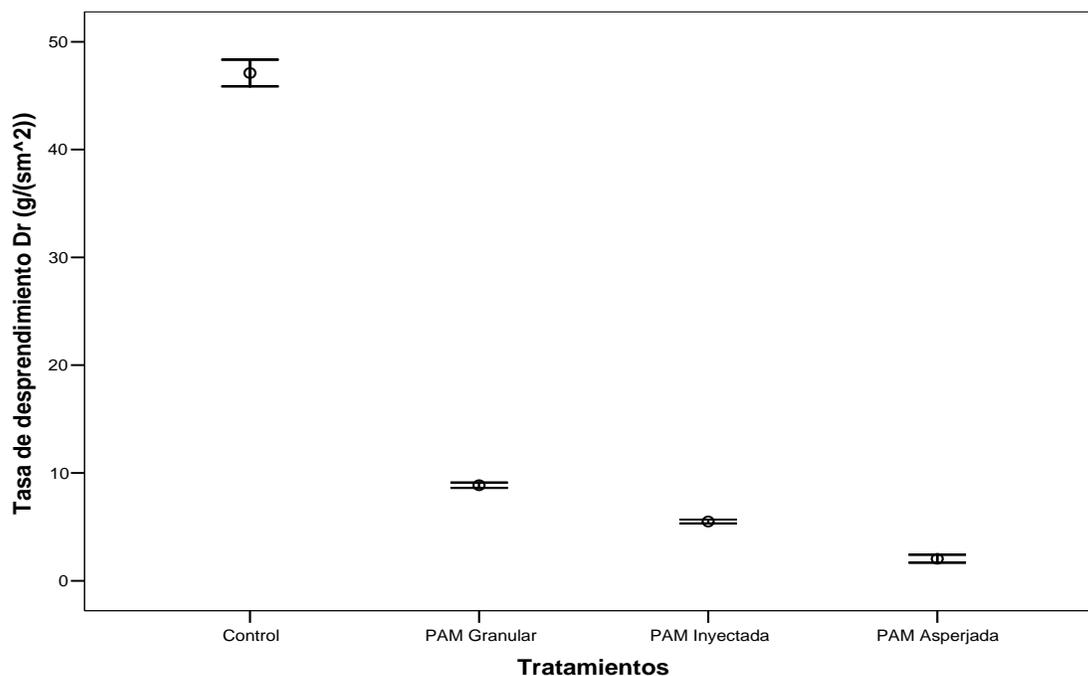
Tratamiento	$D_r^*$ $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$K_r$ $\text{m}^{-1} \text{s}$	$\tau_c$ Pa	$r^2$
<b>Control</b>	47.10	4.218	0.6498	0.9328
<b>PAM Granular</b>	8.80	2.116	1.077	0.9108
<b>PAM Inyectada en Agua</b>	7.30	1.261	1.1084	0.9027
<b>PAM Asperjada</b>	3.20	0.757	1.3923	0.9178

\* En caudal máximo aplicado (250 lph)

El Error Cuadrático Medio (ECM) es de 0.332 para el surco de referencia y para la aplicación granular es de 0.191, entre estas dos anteriores puede verse un cambio significativo en la reducción de sedimentos, no obstante, para el surco con aplicación de PAM inyectada es de 0.168 y para el asperjado sobre el terreno es de 0.15, siendo este último tratamiento, el más eficaz para controlar la erosión en los surcos.

#### 4.2.1 Tasa de desprendimiento $D_r$

La tasa de desprendimiento en surcos  $D_r$  se evaluó en incrementos crecientes del caudal de entrada con y sin aplicación de PAM en cada una de las formas mencionadas con anterioridad. Dando como resultado un desprendimiento de  $47.10 \text{ g s}^{-1} \text{ m}^{-2}$  para el control. Sin embargo, este valor se redujo significativamente en 81.3% con PAM aplicada sobre el terreno en forma granular, significando un desprendimiento de  $8.80 \text{ g s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ . Esta reducción se hizo más notoria cuando se aplicó el polímero diluido inyectado en el agua (práctica común realizada en el riego) y asperjado sobre el terreno, obteniendo una reducción de 84.5% y 93.2% respectivamente. En la Figura 4.6 se muestran los resultados con la desviación estándar de los tratamientos.

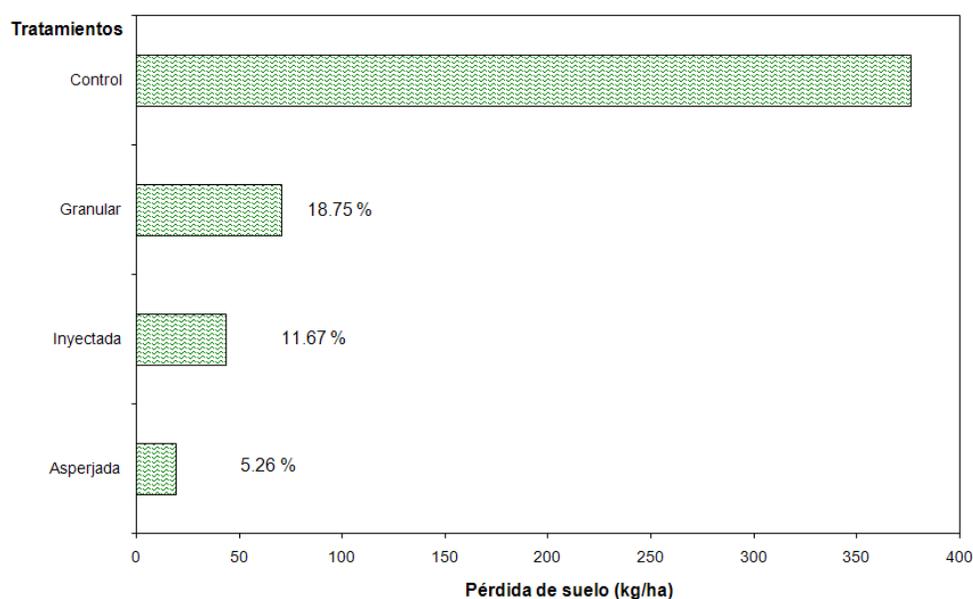


**Figura 4.6.** Reducción de la tasa de desprendimiento en los tratamientos vs control

Si este comportamiento del suelo, en el tramo de 6 metros, se asume que se reproduce de la misma manera en una parcela con surcos de 100 metros de longitud, mismo suelo y misma pendiente y, que el tiempo de riego que se deja circular al agua después de llegar al final del surco es de un minuto en el caso más favorable, tendríamos que:

a). Un surco sin tratamiento esta perdiendo  $47.1 \text{ g s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ , equivalentes a 2.826 kg en cada evento de riego, sin embargo, si se tratara con alguna de las formas que se evaluaron en el presente trabajo, esta perdida se reduciría de 0.528 kg en la condición mas desfavorable (PAM granular) a 0.192 kg en la aplicación mas eficiente (PAM asperjado sobre el terreno).

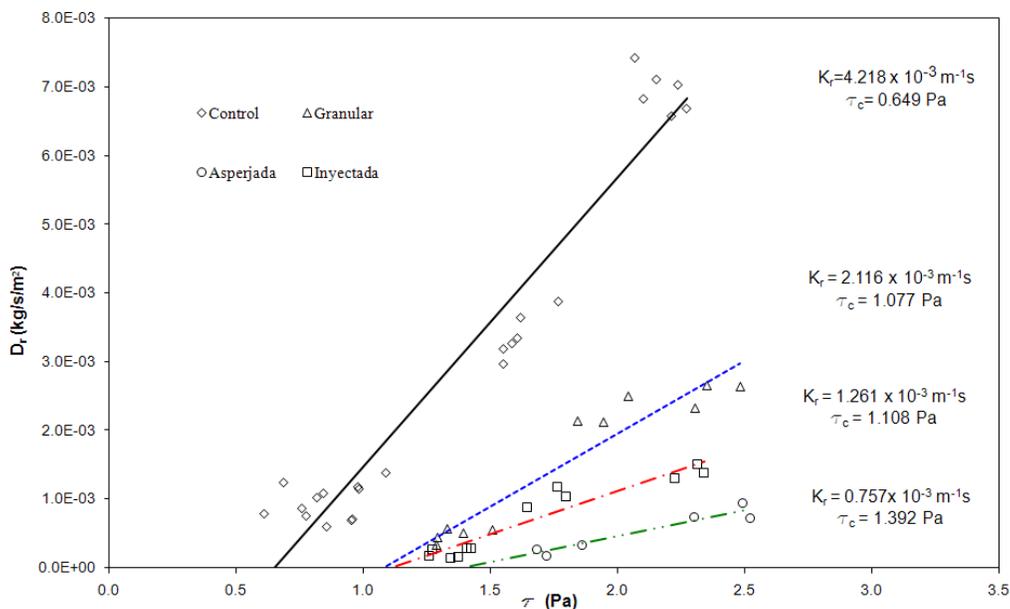
b). Por otra parte, si tomamos un espaciamiento entre surcos de 75 cm, y lo llevamos a nivel de hectárea, tendríamos una pérdida de 376.8 kg de suelo en cada evento de riego para el control (Figura 4.7), siendo a este nivel, una pérdida considerable en suelo potencialmente apto para cultivo, ocasionando una reducción en la vida útil del suelo y por consiguiente, la aplicación de fertilizantes serán en dosis superiores a los ciclos anteriores. Sin embargo, la adición de PAM puede disminuir la erosión, al permitir sólo una pérdida de  $18.75 \text{ kg ha}^{-1}$  con la aplicación granular, y  $5.26 \text{ kg ha}^{-1}$  con aplicación por aspersión, garantizando la conservación del suelo, y prolongando la vida útil del suelo.



**Figura 4.7.** Pérdidas de suelo por evento de riego con y sin tratamiento

Los datos de erosión medidos en campo están representados en la Figura 4.8 con un ajuste lineal. El caudal inicial de entrada es de 75 lph, con incrementos de 50 lph a partir de 100 lph. No obstante que el caudal de entrada fue aumentado gradualmente, el desprendimiento se comportó de manera diferente: el surco de referencia registró una tasa de erosión de 0.3 g l<sup>-1</sup> con caudal inicial y al aumentar el caudal a 100 lph el desprendimiento aumentó en 18.3 g l<sup>-1</sup>, mientras que con 150 lph el aumento sólo fue de 5.7 g l<sup>-1</sup>; el incremento de 150 lph a 200 lph tuvo un bajo impacto en la tasa de sedimentos (6.3 g l<sup>-1</sup>), y con un caudal de 250 lph se registró un incremento de 16.3 g l<sup>-1</sup> con respecto al anterior.

El desprendimiento del suelo inicia en el tratamiento con PAM granular aplicada sobre el terreno al aplicar un caudal de 150 lph, con una tasa de erosión de 0.4 g s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>, con el mismo caudal, inicia el desprendimiento con PAM inyectada sobre el agua, pero sólo reportó 0.1 g s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>, mientras que con PAM asperjada sobre el terreno no hubo desprendimiento. Una diferencia importante se observa en el comportamiento de D<sub>r</sub>, cuyos valores (1 aproximadamente) son muy similares aplicando en el surco control un caudal de 100 lph y 250 lph en el surco tratado con PAM inyectada en el agua, mientras que los valores de D<sub>r</sub> para el tratamiento con PAM asperjada sobre el terreno están aún por debajo de estos valores.

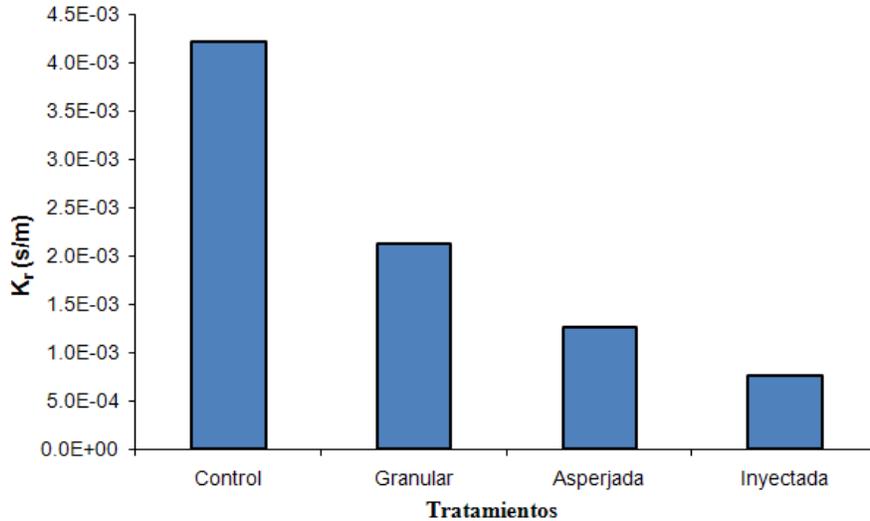


**Figura 4.8.** Relación lineal del desprendimiento del suelo en los diferentes tratamientos.

Como se esperaba, los esfuerzos críticos de corte, definidos como el punto a partir del cual se inicia el desprendimiento y transporte del suelo, presentan diferencias significativas - usando un nivel de significancia  $\alpha$  de 0.05 en la prueba t-student- entre el control y los tratamientos ( $p < 0.0001$ ). De esta manera, para el control, el esfuerzo crítico de corte obtenido es de 0.6498 Pa, mientras que para el tratamiento con PAM granular sobre el terreno es de 1.1214 Pa. Este incremento fue menos notorio en el tratamiento con PAM inyectada en el agua siendo de 1.1078 Pa el esfuerzo crítico de corte; sin embargo, el surco tratado con PAM asperjada sobre el terreno -el cual tuvo mayor efecto- registró un valor de 1.3923 Pa. Este aumento es del orden del doble la fuerza de resistencia del suelo al desprendimiento causado por los flujos concentrados sobre el surco con relación al tratamiento control. Por otra parte, estos valores son creíbles si tomamos en consideración que el rango típico de los esfuerzos críticos de corte encontrado por Foster y Meyer (1975) para suelos agrícolas es de 1.0 a 3.0 Pa, sin embargo, debido a que las condiciones y el material con los que trabaja cada investigador son diferentes, los resultados pueden variar con relación a los esperados ó planteados hipotéticamente.

#### **4.2.2 Factor de erodabilidad $K_r$**

El factor de erodabilidad  $K_r$  es dinámico, en el sentido que puede cambiar al realizar trabajos de conservación, laboreo, riego, etc., de esta manera,  $K_r$  decrece en 50% con relación al control, como resultado de la adición de PAM al suelo de forma granular. Este cambio se asocia a que la PAM cambia las propiedades tanto físicas como químicas del suelo, dando mayor fuerza cohesiva a las partículas y mejorando la estabilidad de los agregados. Sin embargo, la respuesta del suelo a la aplicación de PAM no es igual a las tres formas evaluadas. Considerando únicamente las tres formas de aplicación de PAM, puede verse que el valor promedio de  $K_r$  para la aplicación granular es de  $2.11 \text{ m s}^{-1}$ , mismo que disminuye a  $1.26 \text{ m s}^{-1}$  y  $0.75 \text{ m s}^{-1}$  con PAM diluida asperjada sobre el terreno e inyectada en el caudal de entrada respectivamente (Figura 4.9). De esta manera, la pendiente de regresión de los datos nos dice que la aplicación del polímero diluido y asperjado sobre el terreno, es la forma más eficiente de controlar la erosión.



**Figura 4.9.** Valor del factor de erosión  $K_r$  ( $m s^{-1}$ ) en función de la aplicación de PAM en sus tres formas

Los datos  $(\tau, D_r)$  fueron ajustados a una línea recta, sin embargo es posible que el factor de erodabilidad dependa del propio esfuerzo cortante en el lecho del surco. Por tal razón los datos también fueron ajustados con la ecuación (2.10). Las ecuaciones (2.10) y (3.12) son equivalentes, si el factor de erodabilidad sigue la dependencia siguiente:

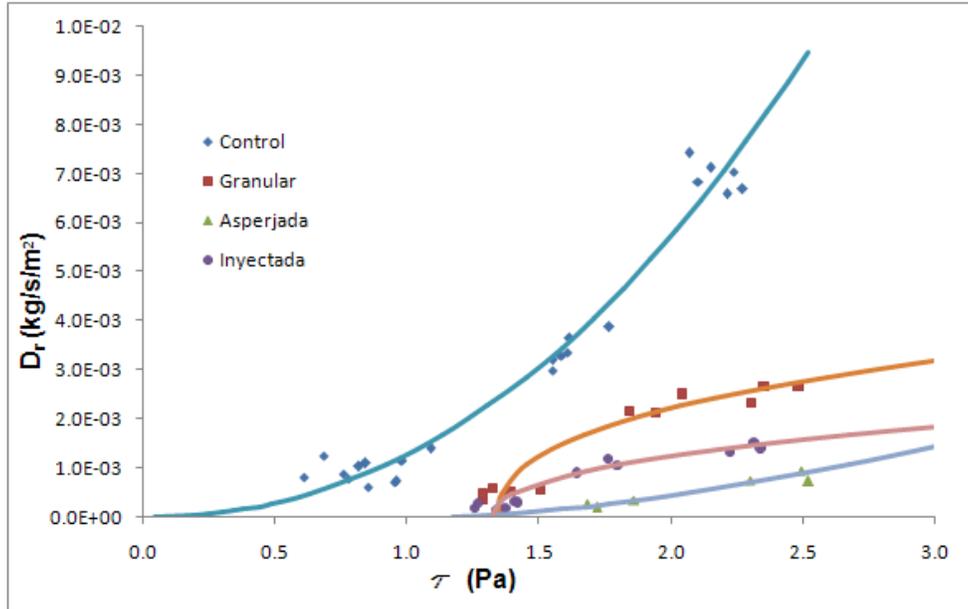
$$K_r = K(\tau - \tau_c)^{\alpha-1} \quad (4.1)$$

Los estimadores de los valores del coeficiente  $K [M^{1-\alpha} L^{-2+\alpha} T^{-1+2\alpha}]$  y del exponente  $\alpha$  de la ecuación (2.10) son obtenidos con el método de mínimos cuadrados, aplicando la ecuación (2.10) bajo la forma  $\tau = \tau_c + (1/K)^{1/\alpha} D_r^{1/\alpha}$ . Los valores son reportados en el Cuadro 4.5 y se muestra gráficamente en la Figura 4.10.

**Cuadro 4.5. Resumen de resultados obtenidos de la aplicación de PAM. Ecuación Potencial**

Tratamiento	$D_r^*$ $kg m^{-2} s^{-1}$	$K$ $kg^{1-\alpha} m^{-2+\alpha} s^{-1+2\alpha}$	$\tau_c$ Pa	$\alpha$	$r^2$
<b>Control</b>	47.10	1.2727	0.0035	2.1763	0.9560
<b>PAM Granular</b>	8.80	2.6121	1.3443	0.4024	0.9324
<b>PAM Inyectada en Agua</b>	7.30	1.4598	1.3290	0.4319	0.9489
<b>PAM Asperjada</b>	3.20	0.5539	1.1546	1.5408	0.9225

\* En caudal máximo aplicado (250 lph)



**Figura 4.10.** Relación potencial del desprendimiento del suelo en los diferentes tratamientos

Aunque la ecuación potencial, ecuación (2.10), es ligeramente superior que la ecuación lineal, ecuación (2.24), se retiene la última ya que es necesario contar con una mayor cantidad de datos para argumentar la utilización de la primera ecuación.

### 4.2.3 Pérdida de sedimentos

La pérdida de sedimentos medida se observa en la Figura 4.11, donde la diferencia que existe entre el surco control con respecto a los surcos tratados con PAM es significativo, es decir, para un caudal de 100 lps el surco control pierde aproximadamente 20 gramos por cada litro de agua que pasa a través del surco, mientras que en los surcos tratados con PAM no tienen pérdida alguna.

De esta manera, con el caudal de 250 lph el surco control pierde cerca de 45 gramos por litro mientras que los surcos con tratamiento de PAM en el caso menos eficiente (PAM Granular) pierde 10 gramos, y el más eficiente solo pierde menos de 5 gramos por litro (PAM asperjada sobre el terreno). Esto se puede apreciar con las detalle en la Figura 4.12. Donde es importante hacer notar que con caudal de 200 lph el surco tratado con PAM

asperjada solo desprende aproximadamente  $0.2 \text{ g l}^{-1}$  por  $2 \text{ g l}^{-1}$  y  $3 \text{ g l}^{-1}$  que pierden el inyectado y asperjado respectivamente.

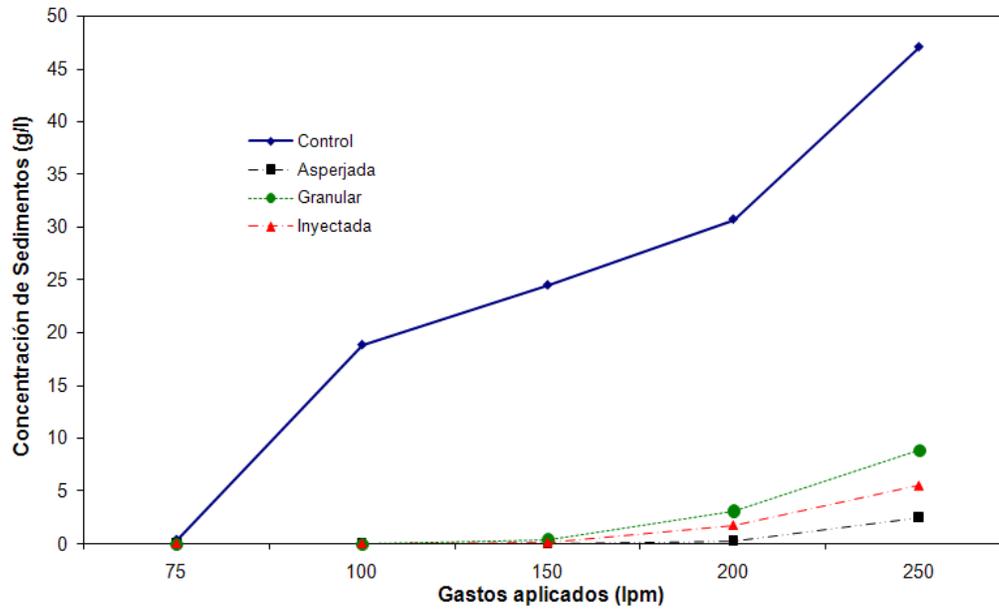


Figura 4.11. Pérdida de suelo asociado a diferentes caudales de entrada en los tratamientos aplicados

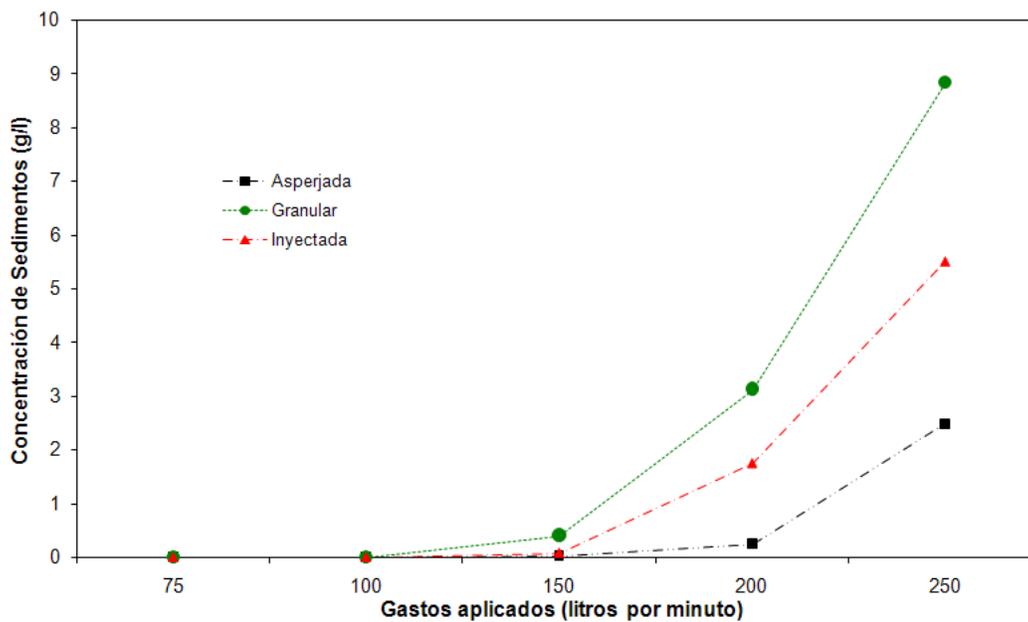
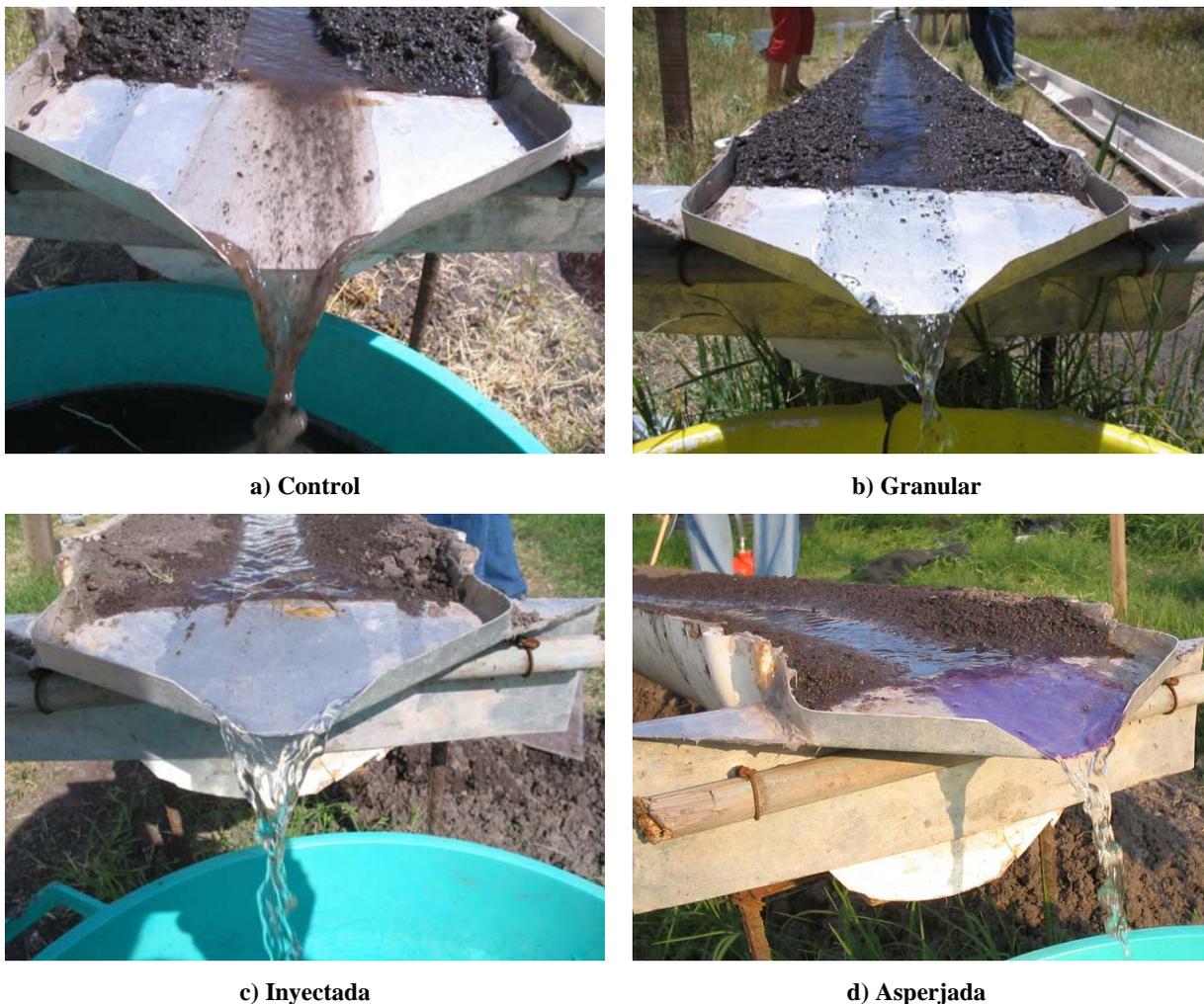


Figura 4.12. Pérdida de suelo con diferentes caudales y formas de aplicación de la PAM al terreno

Los resultados vistos de otra manera, se pueden apreciar en la Figura 4.13, donde de manera gráfica se reafirma que la pérdida de sedimentos causado por flujos concentrados - con caudal máximo de 250 lph- es menor con poliacrilamida asperjada sobre el terreno.



**Figura 4.13.** Pérdida de sedimentos en los diferentes tratamientos

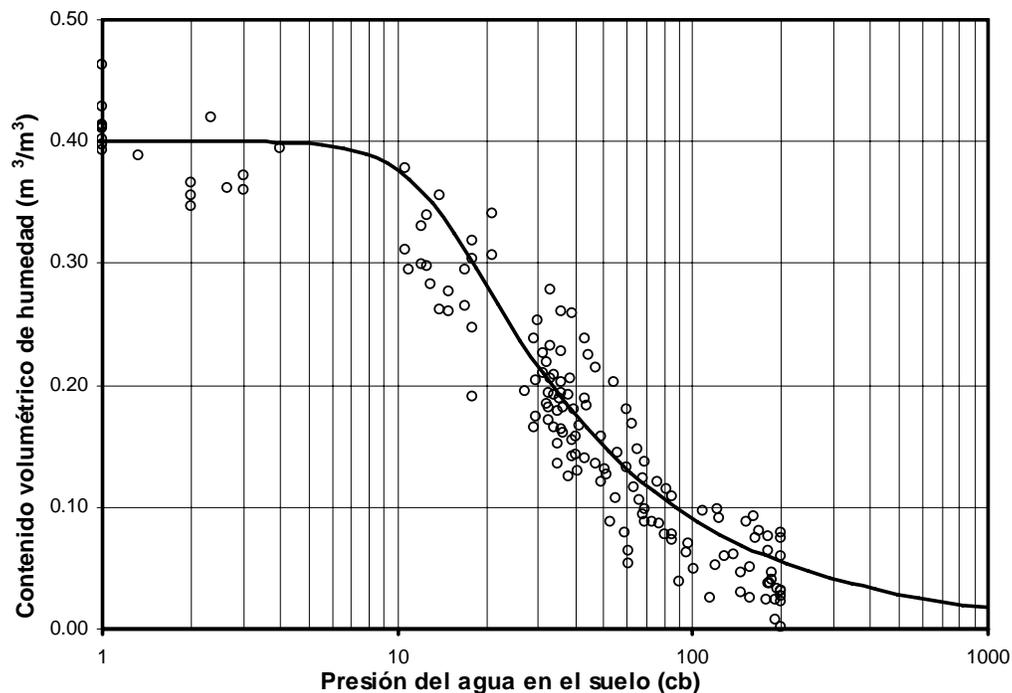
### 4.3 USO EFICIENTE DEL AGUA

El proceso de calibración de los sensores se muestra en el Cuadro 4.5, el cual corresponde a las lecturas del día 4 del proceso de secado del suelo, la toma de las mediciones se dio por terminado una vez que el sensor marcó 200 centibares (cb), es decir, cuando la tensión en el suelo era de 2 metros de columna de agua, medida que teóricamente corresponde al punto donde las plantas se encuentran en estrés hídrico.

**Cuadro 4.6. Calibración de Sensores WaterMark**

Maceta	Peso Maceta	Peso Sensor	Peso suelo seco (a 105°C)	Peso Registrado día 4	Peso suelo húmedo	Contenido gravimétrico de humedad	Lectura sensor (cb)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1	0.158	0.066	1.999	2.636	2.710	0.355	14.000
2	0.159	0.066	2.108	2.627	2.704	0.283	13.000
3	0.160	0.066	2.055	2.659	2.734	0.331	12.000
4	0.158	0.066	2.073	2.613	2.685	0.295	11.000
5	0.159	0.066	2.000	2.553	2.623	0.312	10.667
6	0.160	0.066	2.109	2.669	2.738	0.298	12.667
7	0.160	0.066	2.015	2.627	2.700	0.340	12.667
8	0.159	0.066	1.813	2.287	2.354	0.298	12.000
9	0.158	0.065	1.928	2.585	2.658	0.379	10.667

La curva de retención obtenida se muestra en la Figura 4.14



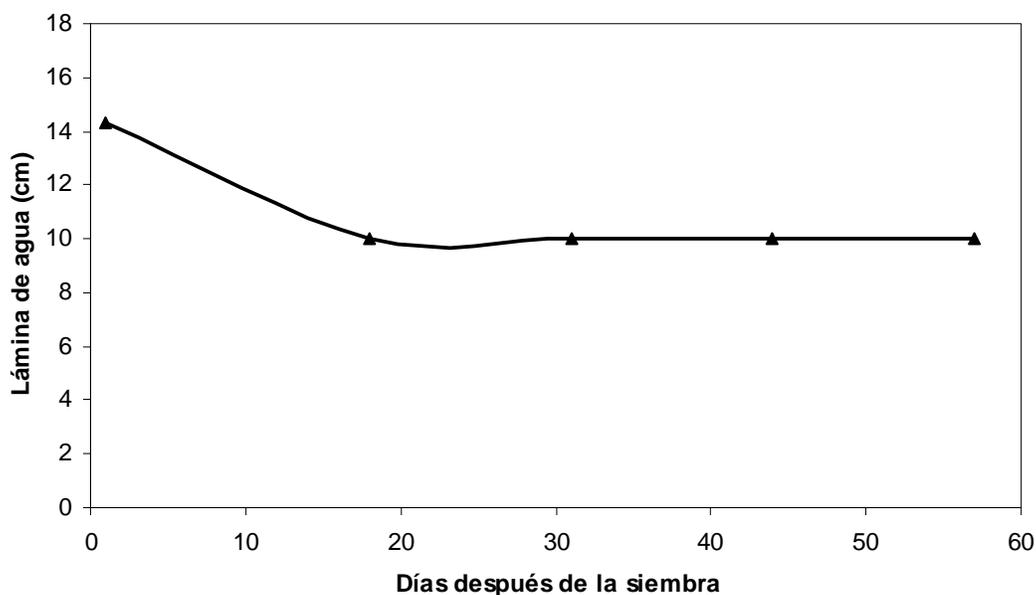
**Figura 4.14. Curva de retención de agua experimental y ajustada con la ecuación (3.13), con  $\theta_r = 0.0000 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ,  $\theta_s = 0.4000 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ,  $\psi_d = 12.84 \text{ cb}$ ,  $m = 0.185$  y  $n = 3.903$ .**

El cálculo de la porosidad de acuerdo con la ecuación (3.18) es de  $\phi = 0.6038 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  tomando la densidad aparente del suelo calculada con anterioridad y una densidad de las partículas de  $2.65 \text{ g cm}^{-3}$ .

La raíz del error cuadrático medio en la humedad, de acuerdo con la ecuación (3.19), es  $RECM = 0.0364 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ; y la raíz del error cuadrático medio del grado efectivo de saturación, de acuerdo con la ecuación (3.20) es  $\langle \Delta \Theta \rangle = 0.0908$ , de esta manera el error de la curva de calibración es del orden de 9.08%.

El cálculo de los intervalos de riego se realizó usando el programa CropWat 4 para Windows versión 4.3 de la FAO (programa que usa el método Penman-Monteith para la evapotranspiración de referencia de los cultivos y el cálculo del programa de riego). De acuerdo a los resultados que arrojó el programa, es necesario aplicar una lámina bruta entre los 50 y 60 cm para el cultivo de avena durante todo su periodo vegetativo, para este caso se tomó una lámina de 55 cm, considerando que la mayor demanda del vital líquido se concentra durante la etapa de crecimiento y floración. El programa generó el calendario de riego mostrado en la Figura 4.15, considerando una eficiencia del 70%.

En esta figura podemos apreciar que el primer riego de auxilio después de realizar la siembra corresponde a una lámina de 14 cm y de éste al segundo riego, hay un tiempo de 17 días; posteriormente se reduce este intervalo a 13 días con una lámina de 10.0 cm, haciendo un total de cinco riegos.

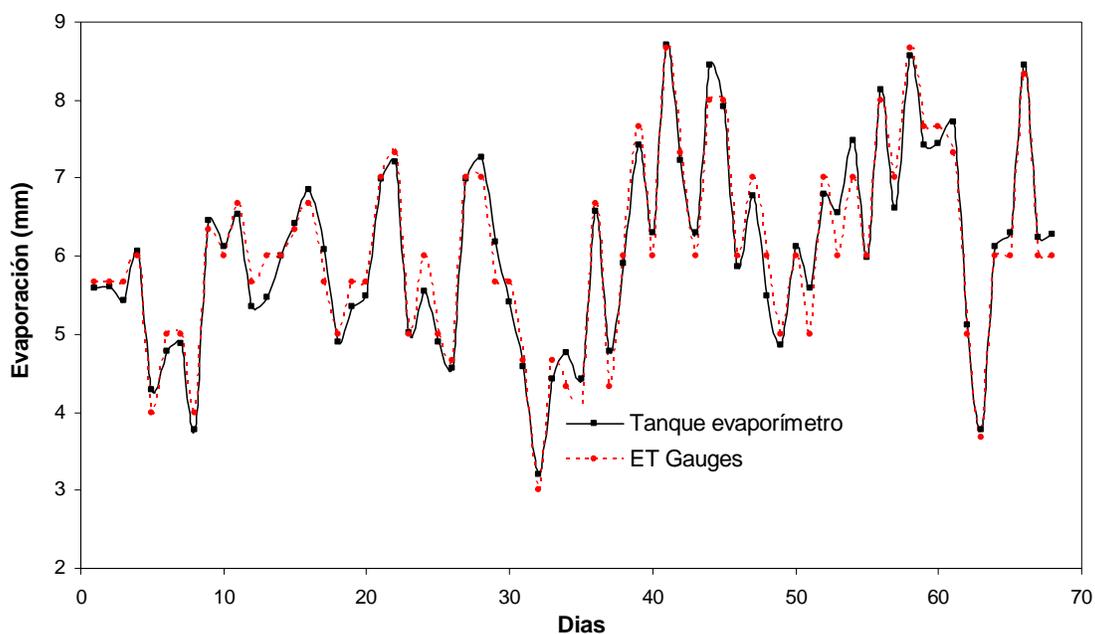


**Figura 4.15.** Calendario de riego calculado con el programa CropWat 4 versión 4.3

### 4.3.1 Variables del clima

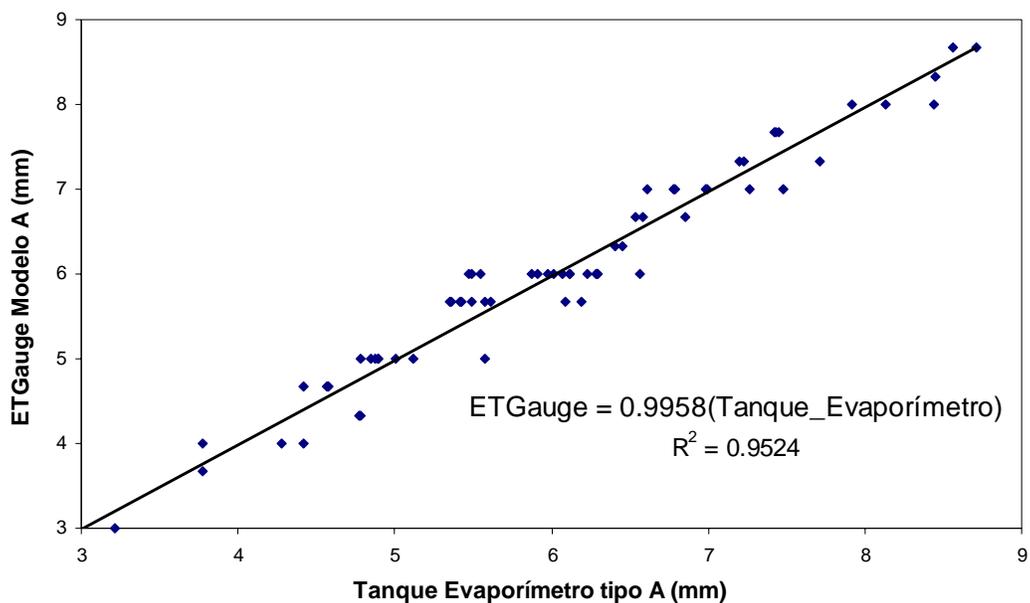
El monitoreo de la evaporación se realizó con el tanque evaporímetro tipo A y tres ETGauges modelo A, medidos diariamente. Al término de la producción de la avena se tuvo una evaporación acumulada de 41.2 cm. Estos datos se pueden observar en la Figura 4.16, donde el valor mostrado en los ETgauges es el promedio de los tres. En esta misma figura puede verse la similitud que existe entre los datos registrados por los dos métodos, sin embargo, es importante resaltar que en algunas ocasiones el Tanque Evaporímetro registró mayor pérdida de agua que los ETGauges, esto es porque en el tanque evaporímetro se mide la evaporación potencial y en los ETGauges se mide la evapotranspiración.

En la Figura 4.17, se muestra la relación que existe entre ambas mediciones, con un coeficiente de determinación  $r^2 = 0.9528$ , sin embargo, la teoría señala que la evapotranspiración (medida con los ETGauges) corresponde al 70% de la evaporación potencial (medida con el tanque evaporímetro tipo A).

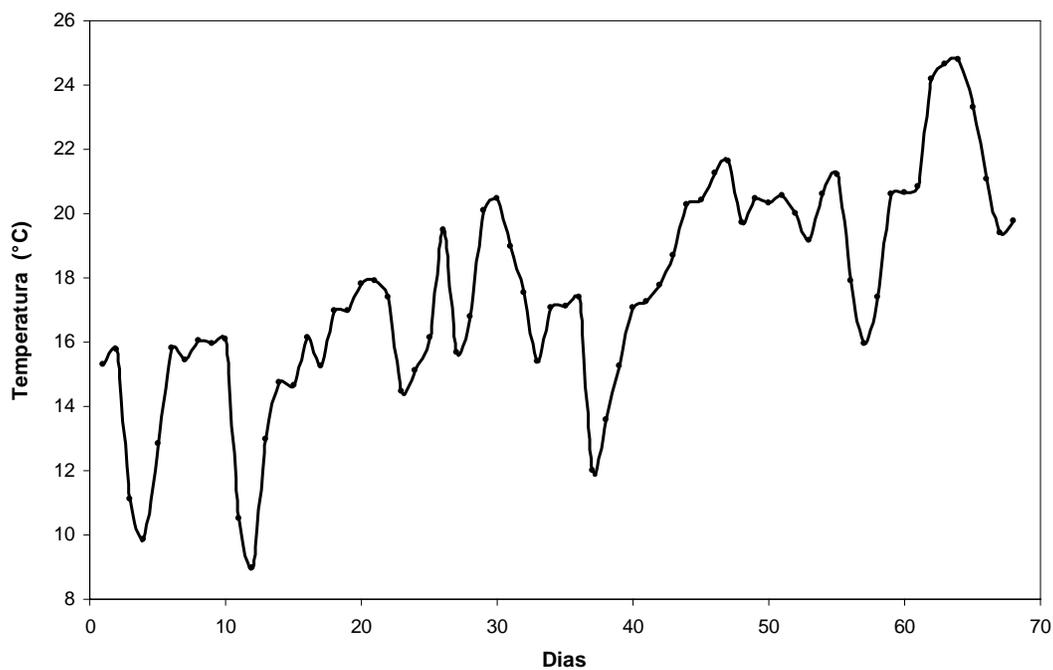


**Figura 4.16.** Evaporación medida con EtGauges Modelo A y Tanque Evaporímetro

Estos cambios de un día a otro en cuanto a la evaporación se refiere, están íntimamente ligados a la radiación solar: días con evaporaciones menores a 4 mm corresponde a días nublados, y los días con mayor evaporación dieron paso a días despejados, propiciando las condiciones favorables para el desarrollo del cultivo (Figura 4.18).



**Figura 4.17.** Correlación de la evaporación medida con ETGauges modelo A y Tanque Evaporímetro tipo A



**Figura 4.18.** Temperatura promedio registrada en la estación climatológica

Los valores registrados de temperatura con la estación climatológica, muestran una tendencia creciente, iniciando con 15.5°C el día de la siembra y terminando con 23°C aproximadamente, pero hubo días en los cuales la temperatura decreció notablemente (12, 38 y 58) por que la curva de evolución tiene caídas repentinas. Tendencia similar se observó en la evaporación, los días más calurosos corresponden a días con mayor evaporación y viceversa. Solo en algunos días los valores registrados de evaporación no tuvieron la misma respuesta con la temperatura, este fenómeno pudo ser provocado por el viento, es decir: el viento actuó como un ventilador natural logrando disminuir el calentamiento del agua del tanque evaporímetro, mismo que mermó la cantidad de agua evaporada.

#### **4.3.2 Humedad del suelo**

La variable que se midió en suelo durante el desarrollo del cultivo fue principalmente el contenido de humedad, debido a que dependía de éste la aplicación del segundo riego en la parcela. El grado máximo de saturación del suelo obtenido de la curva de calibración de los sensores, se asumió como el 100% del contenido de agua, de aquí, el criterio elegido para la aplicación del siguiente riego se realizó tomando como base cuando la parcela con tratamiento de yeso + PAM tuviera 35% de humedad (el cual representa una lectura aproximada de 50 - 60 centibares [0.510 - 0.612 mca]). El proceso de humedecimiento y secado del suelo correspondiente al desarrollo fenológico del cultivo se puede apreciar en la Figura 4.19.

El contenido de humedad al momento de aplicar el riego se aprecia con mayor detalle en la Figura 4.20, donde se muestra la evolución de la variable durante el periodo de siembra hasta el momento de aplicar el primer riego; además se muestra la diferencia del contenido de humedad entre los tratamientos al momento de realizar el segundo riego. La aplicación del segundo riego en base al criterio anteriormente mencionado, se tuvo a los 17 días en la parcela control, mientras que en la parcela tratado con yeso + PAM fue hasta los 21 días. La diferencia del contenido de humedad entre ambos tratamientos, se debe principalmente a que la aplicación de yeso redujo los agrietamientos del suelo causados por el proceso de secado, favoreció el aireamiento y la infiltración del agua; y el polímero redujo la erosión

del suelo, ayudó a que el frente de avance del agua fuera mas homogéneo y con ello una mejor distribución, y creó una capa superficial que impidió el rápido secado del suelo por efecto de la evaporación (Sojka *et al.*, 1998; Lentz y Sojka, 2000).

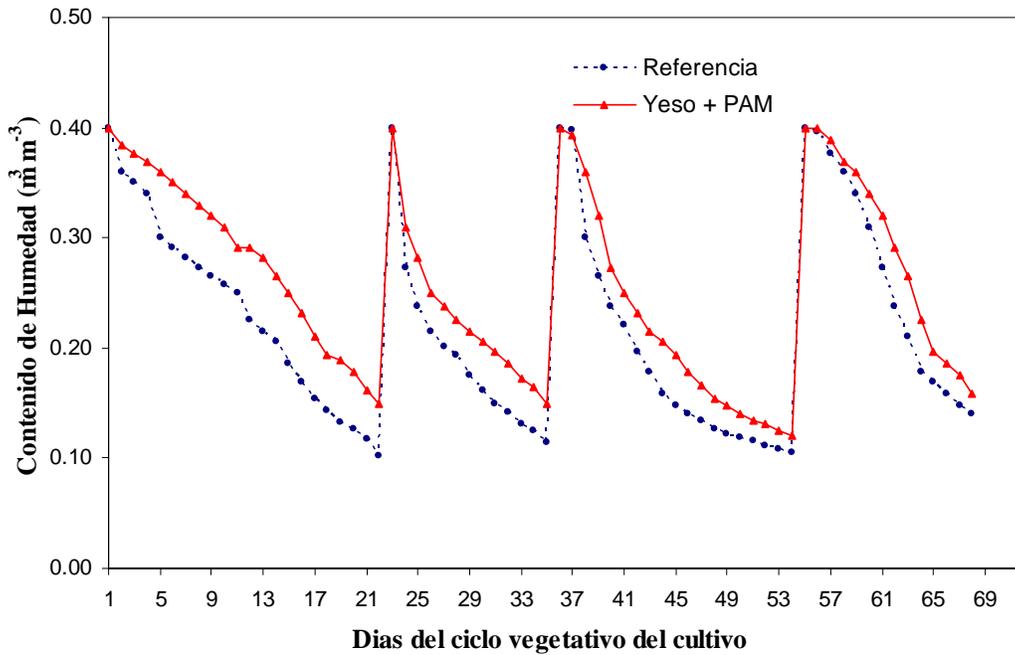


Figura 4.19. Proceso de humedecimiento y secado del suelo

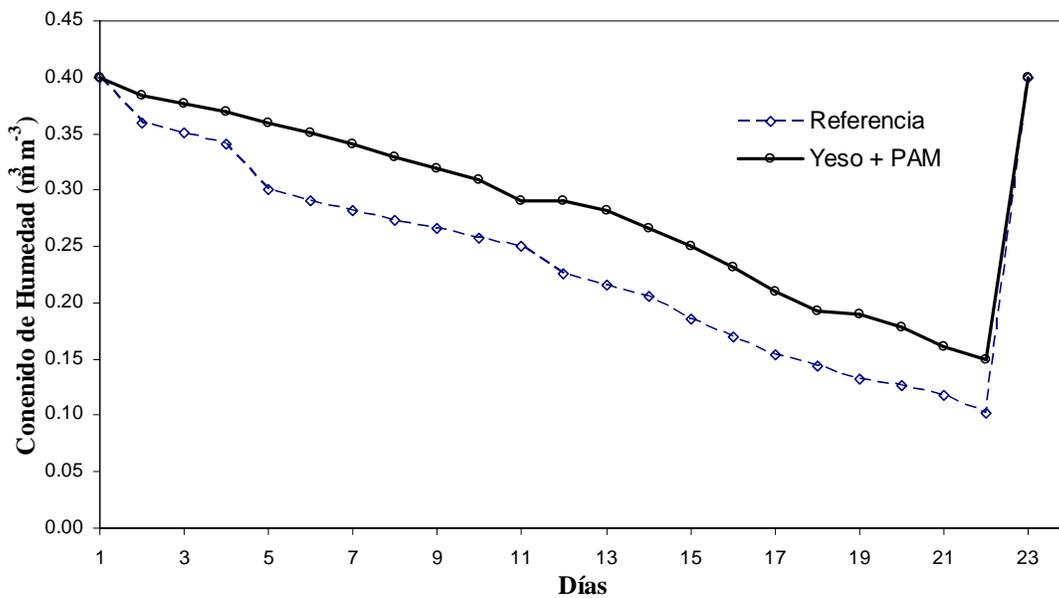


Figura 4.20. Curva de humedecimiento y secado del suelo al primer riego

### 4.3.3 Variables de la planta

#### a) Crecimiento y desarrollo

El crecimiento de la planta se monitoreo semanalmente eligiendo al azar 20 plantas en cada parcela, donde se midió la altura y el contenido de clorofila. Este crecimiento se ve reflejado en la Figura 4.21. La altura de las plantas en general es mayor en la parcela con yeso + PAM, donde al término de la cosecha se observa una altura mayor, el cual es superior a 5.0 cm. Realizando la prueba t-student, la altura promedio al término de la producción difiere significativamente en las parcelas tratadas con yeso + PAM en comparación con la parcela de control ( $p < 0.002$ ), presentando mayores rendimientos la parcela con tratamiento.

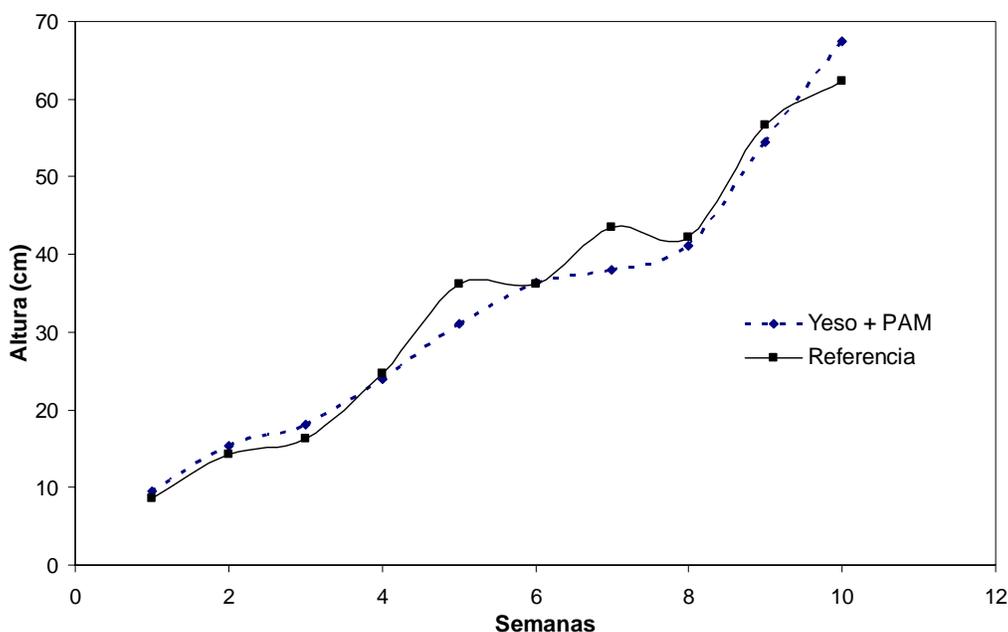


Figura 4.21. Curva de crecimiento del cultivo

#### b) Rendimiento

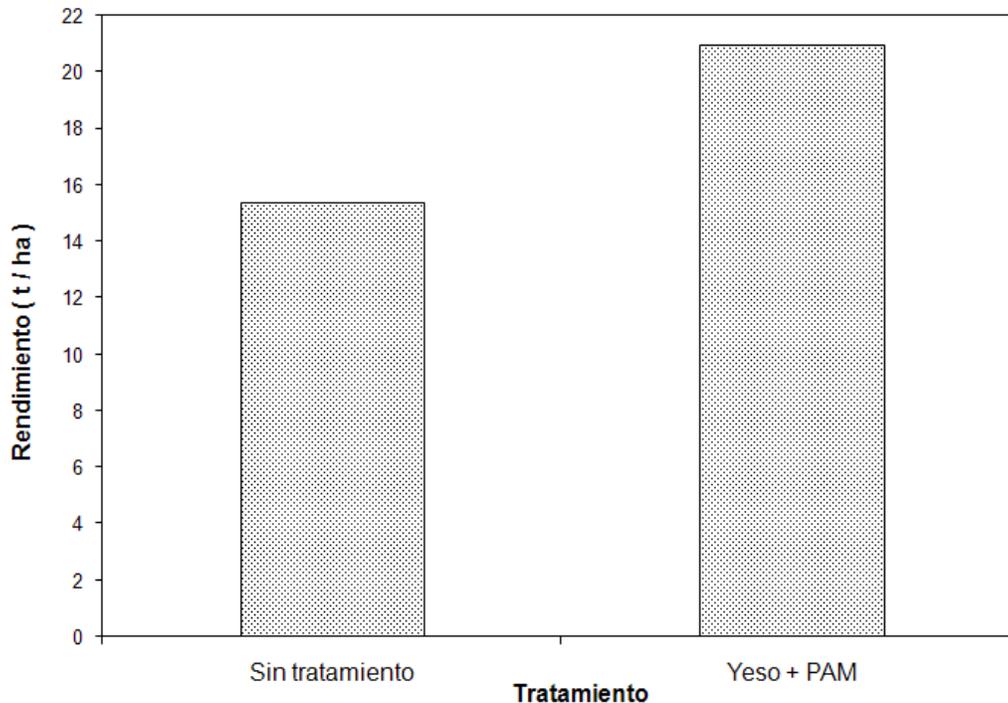
La cosecha se realizó cuando la planta estaba en proceso de formación de grano, debido a que se le dio el uso de forraje (Figura 4.22). Al momento de la cosecha la avena que se encontraba en la parcela que contenía yeso + PAM, se mostraba con mayor turgencia,

presentaba mayor desarrollo de granos y el tallo, estaba con más vigor que la de referencia. Se puede ver que el cultivo tratado presenta mayor altura, lo que ocasionó un incremento del rendimiento considerablemente. El rendimiento obtenido en la parcela de referencia fue de  $15.41 \text{ t ha}^{-1}$ , y para la parcela tratada con yeso + PAM se obtuvo un rendimiento de  $20.95 \text{ t ha}^{-1}$ , el cual representa una ganancia de  $5.542 \text{ t ha}^{-1}$ , es decir, se obtuvo 35% más de rendimiento (Figura 4.23). Esta diferencia se convierte en ganancia extra para el productor y con ello mayor beneficio.

El rendimiento promedio por surco difiere significativamente en las parcelas tratadas con yeso + PAM en comparación con la parcela de control ( $p < 0.001$ ), presentando mayores rendimientos la parcela con el tratamiento. La tensión de humedad del suelo causado por la aplicación de PAM y yeso al terreno influyeron significativamente en el rendimiento de la avena. Hanson *et al.* (2003) encontraron tendencia similar con riego por aspersión y Barrios *et al.* (2006) obtienen un incremento del 30 y 27% con sistema de riego por goteo con relación a un sistema de riego en surcos, usando ajo como cultivo de referencia.



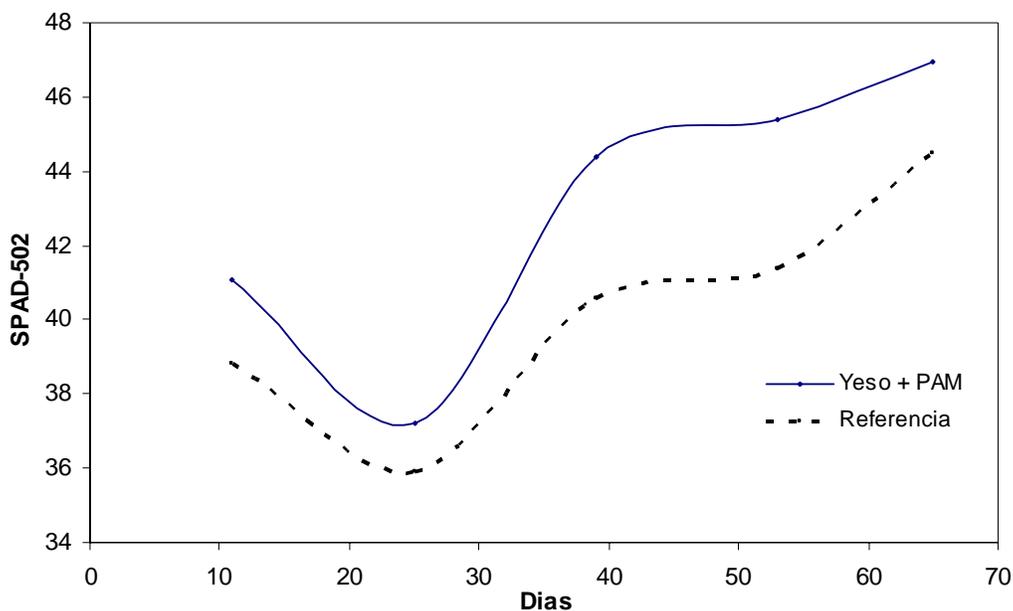
**Figura 4.22.** Estado de la planta al momento de la cosecha: izquierda (Referencia), derecha (yeso + PAM)



**Figura 4.23.** Rendimiento del cultivo al término de la producción

### c) Clorofila

La evolución del contenido de clorofila en los dos tratamientos se muestra en la Figura 4.24, la cual demuestra que las plantas en la parcela con tratamiento se encontraron en mejores condiciones que las plantas de la parcela de referencia. En el día 25 se observa un decaimiento del contenido de clorofila, relacionado con la pérdida de humedad en el suelo, debido a que la planta se sometió a estrés hídrico. Posteriormente hay una mejora en la producción de clorofila de las plantas, mismo que se ve reflejado hasta el término de su madurez fisiológica. Sin embargo, es notable que las plantas tratadas con yeso + PAM sintetizaron mayor cantidad de clorofila, lo que se traduce en un mayor crecimiento de las plantas y un rendimiento superior al término de la cosecha. Por otra parte, existe una relación próxima entre la cantidad de clorofila en la hoja y la cantidad de Nitrógeno (N), de esta manera la medición de Clorofila con el CHOLOROPHYLL METER SPAD – 502 puede ser un indicador del nivel de N, el cual nos da de forma indirecta la necesidad o no de adición de este nutriente al suelo.



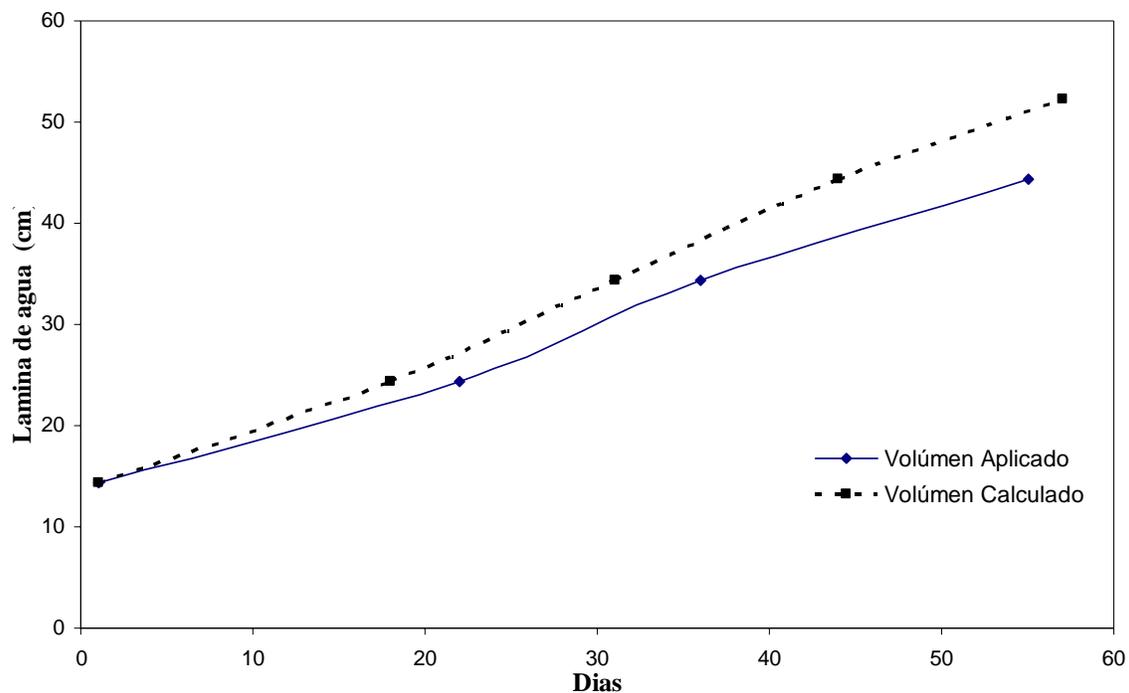
**Figura 4.24.** Evolución del contenido de clorofila en las parcelas

#### 4.3.4 Uso eficiente del agua

El valor promedio de la EUA obtenida en la parcela tratada con yeso + PAM es superior al 36% de la obtenida con el sistema tradicional. Patel *et al.* (1996) obtiene una EUA superior al 60% al comparar el sistema de riego por goteo y el sistema de riego en surcos. Sin embargo el sistema de riego por goteo se caracteriza por la aplicación del agua de manera localizada, frecuente y dosificada, además de su elevado costo de inversión. En el riego por surcos es necesario aplicar grandes volúmenes de agua en la entrada para garantizar en su parte final la aplicación de la lámina de riego requerida por el cultivo (Benjamín *et al.*, 1998), lo cual significa que no hay un control adecuado en el suministro de agua a la zona radicular, provocando pérdidas por percolación y la disminución del la EUA.

El fertilizante nitrogenado aplicado a la parcela con tratamiento ayudó a elevar la EUA, estos resultados coinciden con los obtenidos por Escalante (1995) y Olalde *et al.* (2000), en los cuales, asumen que la mayor EUA está relacionada con una mayor y temprana cobertura del dosel vegetal, causado por la aplicación de N y el aumento en la densidad de población, generando disminución en la evaporación del agua del suelo. En la Figura 4.25

se observa que el primer riego de auxilio se aplicó a los 22 días posteriores a la siembra, el segundo riego tuvo un intervalo de 11 días, y el último riego se aplicó 27 días después. Este último riego se decidió aplicar cuando el suelo tuviera 30% de humedad. Esta diferencia de agua se traduce en una lámina de 10.0 cm, lo que equivale a un ahorro del 20% del volumen total.



**Figura 4.25.** Volumen de agua calculado y aplicado

## 5 CONCLUSIONES

El propósito de este estudio fue evaluar la reducción de la erosión con aplicación de yeso + poliacrilamida en flujos concentrados y, evaluar el uso eficiente del agua usando estos aditamentos, con lo que se logró llegar a las siguientes conclusiones:

La aplicación de poliacrilamida al suelo en cualquiera de las formas de aplicación ayuda a reducir el desprendimiento de las partículas de suelo causada por los esfuerzos hidráulicos y críticos de corte. Sin embargo su aplicación de manera asperjada sobre el terreno tuvo los mejores efectos, pues logró reducir la erosión en 94.4% con respecto al surco sin tratamiento.

El desprendimiento del suelo ( $D_r$ ) varía en los diferentes tratamientos. Se obtuvo un desprendimiento de suelo de  $1 \text{ g s}^{-1} \text{ m}^{-2}$  en el surco sin tratamiento aplicando un caudal de 100 lph, mientras que para la PAM diluida e inyectada en el agua se obtuvo el mismo desprendimiento pero con un caudal de entrada de 250 lph. Con lo cual, logramos reducir el desprendimiento del suelo considerablemente.

Con aplicación de PAM se logró disminuir la pérdida de sedimentos de 45 gramos por litro en el surco control a 10, 5 y 0.2 gramos por litro con aplicación de PAM granular, diluida e inyectada en el agua y, diluida y asperjada sobre el terreno respectivamente. Teniendo como compensación una reducción significativa en la pérdida de nutrientes del suelo causada por los flujos concentrados de agua que pasan dentro de ellos al realizar el riego del cultivo o los cultivos en producción.

La ecuación de calibración de los sensores es única para cada tipo de suelo, debido a que cada suelo presenta un comportamiento causado por sus propiedades tanto físicas como químicas, por lo cual se recomienda hacer una calibración del mismo en cada investigación que se presenta hacer.

Con la aplicación de PAM se logró retener el agua en el suelo por más tiempo en comparación con la parcela control, lo que retraso la aplicación del riego. Al momento de aplicar el agua a la parcela, la tratada con PAM estaba con 35% de humedad aprovechable,

mientras que la parcela de referencia tenía 30%. Estos retrasos en los riegos permitieron un ahorro de 20% del volumen total.

La evolución de crecimiento y desarrollo de la planta fue superior en el cultivo tratado con PAM, ya que a lo largo de su etapa fenológica tuvo mayor crecimiento; este mismo comportamiento tuvo la cantidad de clorofila producida por las plantas, favoreciendo el metabolismo y su desarrollo. Al momento de la cosecha se tradujo en 5cm de diferencia, mismos que aumentaron 5.542 t ha<sup>-1</sup> con relación a las 15.41 t ha<sup>-1</sup> obtenidas en la parcela control.

La eficiencia de producción obtenida al término de la cosecha en la parcela de referencia fue de 4.77 kg m<sup>-3</sup> de agua utilizado, mientras que la parcela tratada con yeso y el polímero presentó una eficiencia de producción de 6.49 kg m<sup>-3</sup> de agua utilizada, un aumento de 1.72 kg m<sup>-3</sup> de agua utilizado de la parcela de yeso + PAM con respecto a la de referencia.

El proceso de erosión en surcos por flujos concentrados y el uso eficiente del agua, es complicado de evaluar. Por lo que se recomienda que la metodología a utilizar para conocer su comportamiento debe ser la más parecida al proceso que se presenta en la realidad.

Con los resultados descritos con anterioridad podemos darnos cuenta que para obtener una mayor EUA y aumentar el rendimiento del cultivo, no basta con cambiar el sistema de riego, sino que es necesario desarrollar la tecnología apropiada para su operación y la variable más importante de ésta es el manejo de la tensión de humedad del suelo. Los bajos rendimientos que se están obteniendo en las cosechas puede ser causado por una mala optimización de la tensión de humedad en el riego por gravedad y, están perdiendo su rendimiento potencial. Esto significa que no hay un control adecuado en el suministro de agua a la zona radicular, provocando pérdidas por percolación y la disminución del la EUA, sin embargo, la PAM puede ser una solución inmediata a estos problemas por todas las ventajas y beneficios que ofrece con relación a sistemas más eficientes, como el riego por goteo.

## 6 REFERENCIAS

- Antonino, A.C.D., C. Fuentes, W.A. Soares, E. Borges, A.M. Netto, J.R.S. Lima, C.A.B.O. Lira y C. Hammecker. 2005. Caracterización hidrodinámica de los suelos a partir del perfil de las presiones. *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. XX, núm. 4, pp. 45-52.
- Alberts, E.E., J.M. Laflen., W.J. Rawls, J.R. Simanton, y M.A. Nearing. 1989. Soil component. In. USDA Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile Model Documentation, Chap. 6. NSERL Report No. 2. National Soil Erosion Laboratory, USDA – ARS, A. Lafayette. IN.
- Aldama R.A. 1998. Investigación aplicada en los programas de tecnificación de riego. *In. Memorias 3er. Simposium Internacional de Fertirrigación*. FIRCO. León, Guanajuato, México. Pp: 9-16
- Al-Jamal, M.S., S. Ball y T.W. Sammis. 2001. Comparison of sprinkler, trickle and furrow irrigation efficiencies for onion production. *Agric. Water Manage.* 46: 253-266.
- Ajwa, H.A. y T.J. Trout. 2006. Polyacrylamide and water quality effects on infiltration in sandy loam soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:643–650.
- Angus, J.F. y van Herwaarden, A. F. 2000. Increasing water use and water use efficiency in dryland wheat. *Agron. J.*, 93: 290 -298.
- Aparicio, M.F.J. 2005. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Editorial Limusa. México D.F. 303 pp.
- Assouline, S. y M. Ben-Hur. 2003. Effects on water applications and soil tillage on water and salt distribution in a vertisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 852 – 858.
- Barrios-Díaz J.M., M.C. Larios-García, J.Z. Castellanos, G. Alcántara-González, L. Tijerina-Chávez y M.N. Rodríguez-Mendoza. 2006. Efecto del sistema de riego y tensión de humedad del suelo en rendimiento y calidad del ajo. *Terra Latinoamericana* 24: 75 – 81.

- Baumann, D.D.; J.J. Boland y J.H. Sims. 1980. "The Problem of Defining Water Conservation". The Cornett Papers. University of Victoria, Victoria B.C., pp. 125-134.
- Becerra M. A. 2005. Escorrentía, erosión y conservación de suelos. Universidad Autónoma Chapingo. 375 pp. Chapingo México.
- Benjamin, J.G., L.K. Porter, H.R. Duke, L.R. Ahuja y G. Butters. 1998. Nitrogen movement with furrow irrigation and fertilizer band placement. *Soil Science Society of America Journal*. 62: 1103-1108.
- Berg, R.D. y D.L. Carter. 1980. Furrow erosion and sediment losses on irrigated cropland. *Journal Soil Water Conservation*. 35:367-370.
- Bjorneberg, D.L., F.L. Santos, N.S. Castanheira, O.C. Martins, J.L. Reis, J.K. Aase, y R.E. Sojka. 2003. Using polyacrylamide with sprinkler irrigation to improve infiltration. *J. Soil Water Conserv.* 58:283–289.
- Carter, D.L. 1993. Furrow erosion lowers soil productivity. *Journal Irrigation and Drainage*. Eng. ASCE. 119:964-974.
- Cetin, O. y L. Bilgel. 2002. Effects of different irrigation methods on shedding and yield of cotton. *Agricultural Water Management*. 54: 1 – 15.
- Chaudhry, M.H. 1993. Open-Channel Flow. Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs, N.J. USA. 483 p.
- Chow, V. T., D. R. Maidment. y L. W. Mays. 1994. Hidrología Aplicada. McGraw Hill.
- Clarke, R. 1991. Water: The international crisis. London, Earthscan, 193 p.
- CNA. 2005. Síntesis de las Estadísticas del Agua en México. México D. F.
- Cochrane, B. H., J.M. Reichert, F.L. Eltz y L.D. Norton. 2005. Controlling Soil Erosion and Runoff With Polyacrilamide and Phosphogypsum on Subtrpical Soil. *ASAE*. 149-154.

- DGCSA-SARH. 1982. Manual de Conservación del Suelo y del Agua. Colegio de Postgraduados. México. 2da Edición.
- Díaz, E., O. Duarte, J. Cerana y P. Fontanini. 2003. Ajuste Metodológico en la medición de la conductividad hidráulica saturada “in situ” en suelos vertisoles y entisoles de la República Argentina mediante el permeámetro de Guelph. *Estudios de la zona no saturada del suelo*. vol. VI. 153 - 157.
- Ellis, J.E., E.G. Kruse, A.E. McSay, C.M.U. Neale y R.A. Horn. 1986. A comparison of five irrigation methods on onions. *Hort. Science*. 21 (6), 1349-1351.
- Escalante, E.J.A. 1995. Aprovechamiento del recurso agua en cultivos de secano. pp. 28-32. In: Colegio de Postgraduados. *Agroproductividad*. Montecillo, Méx.
- Eynar, A., T.E. Schumacher, J.M. Lindstrom y D.D. Malo. (2004). Aggregate sizes and stability in cultivated South Dakota prairie ustolls and usterts. *Soil Science Society of America Journal*. 68: 1360-1365.
- Fahong, W., W. Xuqing y K. Sayre. 2004. Comparison of conventional, flood irrigated, flat planting with furrow irrigated, raised bed planting for winter wheat in China. *Field Crops Research*. 87: 35 – 42.
- FAO-UNESCO. 1988. Mapa mundial de suelos. Organización de las Naciones Unidas. Roma, Italia.
- Fornstrom, K.J. y J. Borelli. 1984. Design and management procedures for minimizing erosion from furrow irrigated cropland. *ASAE*, 84-2595.
- Foster, G. R. y L. D. Meyer. 1972. A closed. From Soil Erosion Equation for Upland Areas. *In: Sedimentation: Symposium to Honor H. A. Einstein*. Colorado State University, Vol. 12. Pag. 1 – 9.

- Foster, G. R. y L. D. Meyer. 1975. Mathematical Stimulation of Upland Erosion by Fundamental Erosion Mechanics. In Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources. USDA – ARS South. Reg. Rep. ARS S - 40. p. 190-207.
- Foster, G. R. 1982. Modeling the erosion process. In “Hydrology Modeling of Small watersheds” (Haan, Johnson and Brakensiek, eds.) Monograph No. 5. *American Society of Agricultural Engineers*.
- Fuentes, C., A.C.D. Antonino, J. Sepúlveda, F. Zataráin, y B. De León. 2003. Predicción de la conductividad hidráulica relativa de los suelos con modelos fractales. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. 18, núm. 4, pp. 31-40.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema climático de Copen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). 4ª ed. Talleres Offset Larios. México, D.F.
- Gilley, J. E., E. R. Kottwitz y J.R. Simanton. 1990. Hydraulic characteristics of rills. *Trans. ASAE* 33(6):1900 - 1906.
- Green, V.S. y D.E. Stott. 2001. Polyacrylamide: Use, effectiveness, and cost of a soil erosion control amendment. In: D.E. Stott, R. Mohtar, and G. Steinhardt (eds.). *The Global Farm – Selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting*. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, May 24-29, 1999, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA
- Hanson, B.R., D. May, R. Voss, M. Cantwell y R. Rice. 2003. Response of garlic to irrigation water. *Agric. Water Manage.* 58: 29-43.
- Horst, M.G., S.S. Shamutalov, L.S. Pereira y J.M. Goncalves. 2005. Field assessment of the water saving potential with furrow irrigation in Fergana, Aral Sea Basin. *Agricultural Water Management*. 77: 210 – 231.
- Huang C. H., J.M. Bradford y J.M. Laflen. 1996. Evaluation of the detachment transport coupling concept in the WEPP rill erosion equation. *Soil Science Society of America Journal*. vol. 60, n 3, pp. 734-739.

- INEGI 1989. “Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática”. Guía para la interpretación de Cartografía. Págs. 21-39
- Juarez, B. E. y R.A. Rico. (2002). Mecánica de suelos, tomo I, fundamentos de la mecánica de suelos. Universidad Nacional Autónoma de México. Ed. Limusa. México. Pág. 77.
- Jian Yu, T. Lei, I. Shainberg, A. I. Mamedov y G. J. Levy. 2003. Infiltration and Erosion in Soils Treated with Dry PAM and Gypsum. *Soil Science Society of America Journal*. 67: 630 – 636.
- Kemper, W.D., T.J. Trout, M.J. Brown y R.C. Rosenau. 1985. Furrow erosion and water and soil management. *Trans. ASAE* 28:1564-1572.
- Kirby M.J. y R.P.C. Morgan. 1984. Erosión de Suelos. Editorial Limusa. 375 pp. México.
- Kornecki, T.S., B.C. Grigg, J.L. Fouss y L.M. Southwick. 2005. Polyacrylamide (PAM) application effectiveness in reducing soil erosion from sugarcane fields in southern louisiana. *American Society of Agricultural Engineers*. 21 (2): 189 – 196.
- Lamm, F.R., H.L. Manges, L.R. Ston, A.H. Khan y D.H. Rogers. 1995. Water requirement of subsurface dripirrigated corn in northwest Kansas. *Trans. ASAE* 38 (2), 441 - 448.
- Lane, L. J. y G.R. Foster. 1983. Concentrated for relationship. In *CREAMS-A Field Scale Model for Chemicals*, Vol. III, Supporting Documentation, Chap. 11, *USDA-SEA Conservation Report No. 26*, pp. 474 – 485.
- Leib, B.G., C.A. Redulla, R.G. Stevens, G.R. Matthews y D.A. Strausz. 2005. Erosion control practices integrated with Polyacrylamide to reduce sediment loss in furrow irrigation. *Soil & Water Division of ASAE*. 21(4): 595 – 603.
- Lentz, R.D. 2003. Inhibiting water infiltration with polyacrylamide and surfactants: Applications for irrigated agriculture. *J. Soil Water Conserv.* 58:290–300.
- Lentz, R.D. y R.E. Sojka. 2000. Applying polymers to irrigation water: Evaluating strategies for furrow erosion control. *Trans. ASAE* 43:1561–1568.

- Lentz, R.D., R.E. Sojka y B.E. Mackey. 2002. Fate and efficacy of polyacrylamide applied in furrow irrigation: Full-advance and continuous treatments. *J. Environ. Qual.* 31:661–670.
- Lentz, R.D., R.E. Sojka, C.W. Robbins, D.C. Kincaid y D.T. Westermann. 2001. Polyacrylamide for surface irrigation to increase nutrient-use efficiency and protect water quality. *Comm. in Soil Sci. and Plant Analysis* 32(7-8): 1203-1220.
- Maderey R.L.E. 2005. Principios de Hidrogeografía: Estudio del ciclo hidrológico. Instituto de Geografía. UNAM. Textos Universitarios. Núm.1.
- Mailhol, J.C., A. Zairi, A. Slatni, B. Ben-Nouma y H. El Amani. 2004. Analysis of irrigation systems and irrigation strategies for durum wheat in Tunisia. *Agricultural Water Management.* 70: 19 – 37.
- Mandal, U.K., S.K.S. Sundara, U.S. Victor y N.H. Rao. 2002. Profile water balance model under irrigated and rainfed systems. *Agron. J.*, 94: 1024 - 1211.
- Norton, L.D., I. Shainberg y K.W. King. 1993. Utilization of gypsumiferous amendments to reduce surface sealing in some humid soils of the eastern USA. *Catena supplement.* 24: 77 – 92.
- Olalde G.V.M., E.J.A. Escalante, G.P. Sánchez, C.L. Tijerina, C.E.M. Engleman y L.A.A. Mastache, 2000. Eficiencia en el uso del agua y del nitrógeno, y rendimiento del girasol, en función del nitrógeno y densidad de población en clima calido. *Terra Latinoamericana* 18: 51 – 59.
- Orts, J.W., R.E. Sojka y G.M. Glenn. 2000. Biopolymer additives to reduce erosion-induced soil losses during irrigation. *Industrial Crops and Products.* 11: 19 – 29.
- Patel, B.G., V.D. Khanpara, D.D. Malavia y B.B. Kaneria. 1996. Performance of drip and surface methods of irrigation for garlic (*Allium sativum*) under varying nitrogen levels. *Indian J. Agron.* 41: 174-176.

- Palacios Velez E., 1990. "Problemática del uso eficiente del agua en México" (Problems related to efficient water use in Mexico) Proceedings of the International Workshop on Efficient Water Use in Arid Zones, Cuernavaca, Mor., Mexico, March 5-9.
- Prosser I. P. y P. Rustomji (2000). Sediment transport capacity relations for overland flow. *Processes Physical Geography* 24, pp. 179-193
- Resnick R., H. David y K. Kenneth. 1998. Física Volumen 1. Compañía editorial continental. 8va reimpresión. México. Pp- 428 - 429.
- Rivera R.O.C. 2003. Efecto de la Interacción Lluvia – Esguerrimiento en el proceso de erosión en Surcos. Tesis de Grado. Laboratorio de Hidráulica. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Santos, F.L. y R.P. Serralheiro. 2000. Improving infiltration of irrigated mediterranean soils with polyacrylamide. *J. Agric. Engng. Res.* 76: 83 – 90.
- Salcedo A.J.L., R.E. Ventura y Z.F. Luna. 2005. Método Alternativo para Medir la Pérdida de Suelo en Parcelas de Erosión-Esguerrimiento tipo USLE. 1er Congreso Internacional de Ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, México. Abril.
- Shainberg, I. y G.J. Levy. 1994. Organic polymers and soil sealing in cultivated soils. *Soil Sci.* 158:267-273.
- Shrestha, R.K., A.M. Thompson y A. Roa-Espinoza. 2006. The effectiveness of polymers and additives on reducing suspended sediment. *Journal of Soil and Water Conservation.* 61 (3): 169 – 177.
- Sojka, R.E., R.D. Lentz y D.T. Westermann. 1998. Water and erosion management with multiple applications of polyacrylamide in furrow irrigation. *Soil Science Society of America Journal.* 62(6): 1672-1680.

- Tate, D., "Cambios Técnicos y Económicos: El Enigma de los Recursos Hidráulicos", Memorias del Seminario Internacional sobre Uso Eficiente del Agua. México, Octubre 1991, pp. 555-561.
- Toy T.J., G.R. Foster y K.G. Renard. (2002) Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement and Control, John Wiley and Sons Inc., New York.
- UACH. Comisión Nacional de las Zonas Áridas. La desertificación en el altiplano mexicano, 1999. México, D.F., 1999.
- United Nations Organization (ONU). Comisión on Sustainable Development. 1997. Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world. Report of the Secretary General. New York, UNO, 39 p.
- Van Olphen, H. 1977. An introduction to clay colloid chemistry. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA. 318 pp.
- Van Genuchten, M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 44, 1980, pp. 892-892.
- Ventura, E. y L.D. Norton. 2000. Physical and Chemical Processes Associated with structural Soil Degradation and Surface Soil Erosion. En: Quintero-Lizaola *et al.* (Eds). La Edafología y sus Perspectivas al Siglo XXI. Tomo I. CP, UNAM. UACH. pp. 135-144.
- Xi-Ping, D., L. Shan, H. Zhang y N.C. Turner. 2006. Improving agricultural water use efficiency in arid and semiarid areas of China. *Agricultural Water Management*. 80: 23 – 40.

## 7 ANEXOS

### **ANEXO 1: Procedimiento para obtener la conductividad hidráulica**

El procedimiento específico para la determinación de la conductividad hidráulica es como sigue:

- a. Llenar los primeros 7 centímetros de la columna del permeámetro con grava mayor a ¼” de diámetro hasta el nivel superior de la válvula de descarga. Asegurarse de tener una superficie pareja.
- b. Colocar la maya y papel filtro encima de la grava
- c. Llenas los siguientes 10 cm de la columna del permeámetro con el suelo a estudiar, tamizado, seco y homogenizado.
- d. Golpear gentilmente el permeámetro para lograr un empaquetamiento del suelo pero no compactación ni reacomodo exagerado de las partículas. Asegurarse de tener una superficie bien pareja.
- e. Colocar nuevamente un set de maya y papel filtro encima de la columna del suelo.
- f. Agregar una capa de 3 cm de grava del mismo tipo que en el punto 1. El codo que soporta es turno debe de coincidir con el punto medio de estos 3 cm.
- g. En forma muy lenta, sature la columna de suelo por capilaridad inyectando agua por la válvula de paso sumergiendo el permeámetro en un recipiente con agua de manera que el nivel del agua sobrepase ligeramente el nivel del fondo de la columna del suelo. Tenga cuidado de no atrapar aire en el tubo de alimentación. Para asegurarse de una buena saturación permita que el agua sature la muestra por un periodo de 24 horas, agregando agua conforme el suelo lo vaya necesitando.
- h. También se puede ayudar con el tubo de drenaje con tapa que se localiza a 45° de la válvula de descarga para saturar el suelo.
- i. Una vez saturada la muestra por capilaridad puede agregar agua al recipiente en forma lenta hasta hacer coincidir e nivel de agua en el recipiente con el de la segunda capa de grava.
- j. Cuando el espejo del agua aparece en la parte superior, cierre la llave de la válvula de paso y proceda a drenar la columna de agua sobre el suelo totalmente antes de

proceder a realizar mediciones de tiempo y cambio de carga hidráulica. Con esto se promoverá la disolución del oxígeno remanente. Hasta aquí se ha completado la preparación de la muestra.

- k. Proceda a realizar la medición de acuerdo al siguiente procedimiento:
  - i. Cierre la válvula de paso y coloque una columna de agua sobre el suelo hasta el nivel  $h_2$  previamente determinado (se sugiere usar el borde del permeámetro para mayor control).
  - ii. Coloque un recipiente para coleccionar el agua directamente debajo de la espiga de la válvula de paso. Puede ayudarse del tubo de plástico.
  - iii. Abra la llave de paso de la válvula e inicie el registro del tiempo.
  - iv. Registre el tiempo y el intervalo de altura.
  - v. Repita el paso anterior hasta que el valor de tiempo para el intervalo de alturas seleccionado sea aproximadamente constante en al menos tres ocasiones consecutivas.
- l. Proceda a obtener un valor promedio de las últimas tres mediciones
- m. Reporte el valor de  $K_s$  en  $\text{cm s}^{-1}$ .