



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

---

---

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO  
EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

CAPACIDAD DE ABSORCIÓN Y PÉRDIDA DE AGUA DE LOS  
CRISTALES DE POLIACRILAMIDA, SOLOS Y MEZCLADOS  
CON UN SUELO ARENOSO

**T E S I S**

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**  
INGENIERÍA DE SISTEMAS-GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA

PRESENTA:  
**HORACIO FLORES CASAMAYOR**

DIRECTOR DE TESIS:  
**M. C. ALFONSO OLAIZ Y PÉREZ**



2008

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: M. C. Arturo Hidalgo Toledo

Secretario: M. C. Efrén Peña Peña

Vocal: M. C. Alfonso Olaiz y Pérez

1<sup>er</sup>. Suplente: M. I. José Alfredo González Verdugo

2<sup>do</sup>. Suplente: M. I. Edith Salcedo S.

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

División de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM Campus Morelos.

**TUTOR DE TESIS:**

M. C. Alfonso Olaiz y Pérez

---

FIRMA

## **Agradecimientos**

Dice un refrán: “No hay tiempo que no se llegue, ni plazo que no se cumpla”, así que para quien concluye un proyecto como éste, el cual en un principio parece tan lejano, puede resultar difícil dar un justo reconocimiento a todos aquellos que de una u otra forma ayudaron o tuvieron alguna participación en su realización.

Sin embargo, trataré de hacerlo agradeciendo en primer lugar a mi familia por el apoyo y la confianza que me otorgaron cuando decidí comenzar esta nueva etapa en mi desarrollo.

Igualmente, deseo reconocer a todos mis profesores la paciencia y claridad que tuvieron para enseñar y explicarme los diferentes tópicos en sus materias; a todos mis compañeros de clase a lo largo de toda la carrera, la ayuda que se sirvieron darme en diversas ocasiones con las diferentes materias cursadas; al personal administrativo que labora tanto en la UNAM como en la DEPFI campus Morelos, por su dedicación y apoyo para realizar los diferentes trámites administrativos y resolver todos los problemas relacionados con ellos; a todos los miembros que conforman mi jurado por su guía y sugerencias para la mejora de este trabajo.

De la misma forma, quiero agradecer al M. C. Efrén Peña Peña y al ingeniero Armando de los Santos las recomendaciones y facilidades otorgadas para la realización de las diferentes pruebas que se incluyen en este trabajo, mismas que se llevaron a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Suelos, ubicado dentro de las instalaciones del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>4</b>
<b>3. Objetivo</b>	<b>6</b>
<b>3.1. Objetivo General</b>	<b>6</b>
<b>3.2. Objetivos Particulares</b>	<b>6</b>
<b>4. Metodología</b>	<b>7</b>
<b>4.1. Análisis de la capacidad de absorción y retención de agua de la poliacrilamida (PAM) sola</b>	<b>8</b>
<b>4.1.1. Pruebas de absorción con polímero de grano fino y de grano grueso</b>	<b>8</b>
<b>4.1.2. Determinación de agua sin absorber</b>	<b>8</b>
<b>4.1.3. Prueba de evaporación</b>	<b>9</b>
<b>4.1.4 Prueba de absorción de la PAM con sales de MgSO<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y NaCl</b>	<b>9</b>
<b>4.2. Análisis de la capacidad de absorción y retención de agua de la PAM fina mezclada con arena</b>	<b>11</b>
<b>4.3. Costos y cantidades a emplear de la PAM</b>	<b>12</b>
<b>5. Resultados</b>	<b>14</b>
<b>5.1. Pruebas de absorción con polímero de grano fino</b>	<b>14</b>
<b>5.2. Pruebas de absorción con polímero de grano grueso</b>	<b>17</b>
<b>5.3. Determinación del agua sin absorber por los cristales de PAM</b>	<b>21</b>
<b>5.4. Prueba de evaporación de los cristales de PAM</b>	<b>26</b>
<b>5.5. Capacidad de absorción de la PAM de un agua con sales</b>	<b>30</b>
<b>5.5.1 Pruebas de 1:100 y 1:200 con K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, MgSO<sub>4</sub> y NaCl</b>	<b>30</b>
<b>5.6. Prueba de absorción de la PAM mezclada con arena</b>	<b>36</b>
<b>5.7. Determinación del agua absorbida y prueba de retención de la PAM con arena</b>	<b>38</b>
<b>5.8. Análisis estadístico</b>	<b>45</b>
<b>5.8.1. Arena sola vs arena con PAM arriba</b>	<b>47</b>
<b>5.8.2. Arena sola vs arena mezclada con PAM</b>	<b>48</b>
<b>5.8.3. Arena sola vs arena con PAM abajo</b>	<b>49</b>
<b>5.8.4. Arena con PAM arriba vs arena mezclada con PAM</b>	<b>50</b>
<b>5.8.5. Arena con PAM arriba vs arena con PAM abajo</b>	<b>51</b>
<b>5.8.6. Arena mezclada con PAM vs arena con PAM abajo</b>	<b>51</b>
<b>5.9. Costos y cantidades a emplear de la PAM</b>	<b>52</b>
<b>5.9.1. Opción A: PAM en surcos</b>	<b>52</b>
<b>5.9.2. Opción B: PAM en surco</b>	<b>53</b>
<b>5.9.3. Opción C: PAM en macetas</b>	<b>54</b>
<b>6. Conclusiones</b>	<b>56</b>
<b>7. Recomendaciones</b>	<b>58</b>
<b>8. Bibliografía</b>	<b>59</b>

## Resumen

Datos proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (actual Conagua, antes CNA) hasta el año 2007, muestran que el volumen de agua per cápita en el país descendió de 18,035m<sup>3</sup> en 1950 a 4,416m<sup>3</sup> en 2006. Entre las principales causas de este fenómeno se encuentran: el aumento de la población, la sobreexplotación y contaminación de las fuentes de agua superficiales y subterráneas, pocas o nulas políticas de desarrollo urbano e industrial que permitan un mejor aprovechamiento del recurso, entre otras, a las que ahora se agregan otras como el llamado “Cambio climático”.

Ahora bien, diversas investigaciones y estudios muestran que del suministro total de agua que se consume en el país la agricultura absorbe alrededor del 76%, el servicio urbano el 14% y el sector industrial el 10% restante, aunque estas cifras varían dependiendo de la zona en estudio (CNA, 2006).

El principal método de riego empleado en la agricultura es el “riego por gravedad”, que tiene una eficiencia máxima de alrededor del 70%, aunque a nivel nacional el promedio se ubica entre el 30-40%. Por diversas causas los principales centros urbanos, industriales y agrícolas del país se ubican en las porciones Centro y Norte del país las cuales presentan grandes zonas áridas y semiáridas, lluvias irregulares en volumen y temporalidad y una cantidad limitada de agua muy sensible a la sobreexplotación.

En este contexto, se ha promocionado en el ámbito agrícola un producto químico llamado poliacrilamida (PAM), un tipo de polímero que se dice posee propiedades muy útiles para lograr un mejor aprovechamiento del agua disponible, tales como absorber cientos de veces su peso en agua y los fertilizantes disueltos en ella, dejar disponible alrededor del 90% de esa agua para las plantas, soportar líquidos con niveles de pH de 4.5-7.5 y temperaturas de 95°C, entre otras.

A pesar de esas ventajas su empleo en la agricultura no se ha generalizado, por lo que se hizo un análisis de sus parámetros de absorción y retención del agua absorbida contra la evaporación en dos situaciones, al margen de los datos proporcionados para tales parámetros por los fabricantes y distribuidores consultados: primero trabajando la PAM sola y después mezclándola con un suelo arenoso, utilizando en todos los casos agua libre de sales (destilada).

Para realizar las pruebas anteriores se utilizaron dos presentaciones del mencionado producto: de grano fino y de grano grueso. Ambos tipos de polímero se sometieron a las mismas pruebas bajo las mismas condiciones y los resultados obtenidos fueron:

Prueba de absorción: El tipo de grano con el mejor rendimiento fue el fino al absorber un máximo de 353.2mL (50.46%) de agua contra los 263.12mL (37.6%) del grueso. El valor presentado en ambos casos corresponde al obtenido en la prueba con 700mL de agua.

Agua sin absorber: Los resultados nos permiten concluir que si bien la PAM puede absorber cantidades importantes de agua, la máxima cantidad que los cristales absorben está muy por debajo de la manejada por los distribuidores, situándose entre el 50-70% de lo especificado para los volúmenes de agua más grandes (de 300 a 700mL).

Prueba de evaporación: Mostró que la PAM no es capaz de retener el agua absorbida por un tiempo mayor, sin importar la presentación y el volumen de agua absorbido por los cristales, y su ritmo de pérdida de humedad fue prácticamente el mismo que presentó una lámina de agua, con un volumen equivalente en peso a los cristales de PAM hidratados y bajo las mismas condiciones ambientales.

Prueba de absorción de agua con sales: Se utilizó sólo la PAM de grano fino por ser la que mejor desempeño tuvo en la primera prueba de absorción realizada, y mostró que esta capacidad se ve muy afectada aún con cantidades de sal tan pequeñas como las equivalentes a 2, 4 y 8 mS (micro Siemens) de conductividad y se advirtió una caída casi lineal de la absorción a medida que se incrementaba la cantidad de sal disuelta en el agua.

Prueba de absorción de PAM con arena: Los resultados indicaron que si bien el conjunto de PAM más arena logró absorber una cantidad importante de agua, en las tres pruebas este volumen estuvo lejos del máximo teórico calculado de 3,830ml. La prueba que tuvo el mejor desempeño fue la realizada con la PAM arriba, con una absorción de 1,940ml; seguido de la prueba con la PAM y el arena mezcladas con 1,504ml y finalmente la prueba con la PAM abajo absorbió alrededor de 1,243ml.

Las tres pruebas mostraron ventajas y desventajas, las cuales se explican a continuación, y que deben ser consideradas con cuidado al momento de decidirse por alguna de ellas.

El colocar la PAM arriba permite absorber la mayor cantidad de agua pero al sobresalir por sobre la superficie del suelo queda muy expuesta a las condiciones climáticas, ofrece una gran superficie de evaporación y puede sufrir una mayor degradación de su estructura molecular por parte de los rayos solares, lo que disminuiría su rendimiento y su vida útil. Además, al estar la PAM hidratada en la parte superior queda fuera del alcance de las raíces de las plantas, por lo que éstas prácticamente sólo aprovecharían el agua retenida por el suelo.

La que se puede considerar como la mejor opción es mezclar completamente la PAM y el suelo para conseguir una mejor distribución de los cristales hidratados en todo el volumen de suelo y dar mayor oportunidad a las raíces de las plantas para que puedan aprovechar esa humedad. Otra ventaja que se puede tener es que los cristales de polímero quedan más protegidos de los rayos solares y las condiciones climáticas, lo que ayudaría mantener por un mayor tiempo su vida útil.

Su principal desventaja es que se obtiene un menor volumen de agua retenida por los cristales de polímero, comparado con el primer caso, debido al peso y la presión del suelo.

Por último, la opción menos rentable es la de colocar la PAM en los centímetros inferiores del suelo a trabajar ya que la presión ejercida por el suelo impide que los cristales del polímero puedan aumentar su tamaño a medida que se hidratan, por lo que el volumen de agua que pueden retener resulta más bien pequeño comparado con el volumen que retiene el suelo por si solo.

Análisis estadístico: Este estudio se realizó para determinar de forma matemática si los resultados obtenidos en las pruebas de absorción con la PAM sola y en las macetas de la prueba anterior, guardaban una relación más o menos cercana entre ellos y validaran las conclusiones a que se llegaron.

Estudio de factibilidad económica: Se analizaron tres situaciones: aplicando la PAM mezclada con todo el suelo de los surcos, aplicándola sólo en la parte central de los surcos hasta una profundidad de 0.30m y finalmente su uso en macetas, invernaderos o como elemento decorativo.

Los resultados obtenidos muestran que si se desea aplicar la PAM en surcos su costo puede ir de \$562,500-\$1,875,000 por hectárea dependiendo de la forma de aplicación, haciendo que su empleo sea prácticamente inviable.

Por otro lado, el rendimiento de la PAM en macetas con un diámetro de boca de 15cm y una profundidad de suelo de 15cm es de aproximadamente 125 macetas por kilogramo de polímero a un costo de \$2 por maceta, por lo que ésta es la forma de empleo más recomendable.

## 1. INTRODUCCIÓN

Datos obtenidos por diversas instituciones educativas y organismos internacionales muestran que cerca de las  $\frac{3}{4}$  partes de la superficie de la Tierra se encuentran cubiertas por agua, lo cual resulta vital para la supervivencia de casi todas las formas de vida del planeta. Sin embargo, alrededor del 97% de esa agua se encuentra en los diferentes mares y océanos y es salada en mayor o menor grado; el 3% del agua restante es dulce pero de este porcentaje el 78% se encuentra atrapada en los glaciares y casquetes polares, por lo que se considera no aprovechable, y el resto se divide entre los acuíferos subterráneos, ríos, lagos y lagunas por lo que sólo el 0.66% del agua dulce disponible es utilizable por el hombre.

Uno de los mayores problemas a los que en la actualidad se enfrenta el país, como muchos otros países alrededor del mundo, es tener una disponibilidad cada vez menor de agua con la calidad adecuada para ser utilizada tanto para el consumo humano como para las diferentes actividades económicas que la emplean como insumo. Cifras proporcionadas por la Comisión Nacional del Agua (actual Conagua, antes CNA) para el año 2006, muestran que la disponibilidad de agua per cápita en el país sufrió un descenso del 75.5% en los últimos 50 años al pasar de  $18,035\text{m}^3$  en 1950 a  $4,416\text{m}^3$  por año.

Entre los más factores más importantes para esta disminución se destacan el aumento de la población, el crecimiento desordenado de los centros urbanos que ha afectado las zonas de recarga naturales cercanas a ellos, los cambios de uso de suelo, la contaminación y sobreexplotación de muchas de las fuentes superficiales y subterráneas de agua para abastecer a los centros de población y a los diferentes centros industriales y de producción, principalmente agrícolas, entre otros. A lo anterior se suman ahora los efectos del llamado "Cambio climático", si bien aún no se determina la forma y el tamaño de las consecuencias que pueda tener en los diferentes sitios su presencia.

Actualmente diversas zonas del país ya padecen en mayor o menor grado las consecuencias de los factores antes citados e incluso en algunas regiones, como el Valle de México, la disponibilidad de agua se ha reducido a niveles similares a los de países desérticos como Israel, donde se tienen disponibilidades de alrededor de  $85\text{m}^3/\text{año}$  por persona (CNA, 2003).

Diversas investigaciones y estudios muestran que del suministro total de agua que se consume en el país la agricultura absorbe alrededor del 76%, el servicio urbano el 14% y el sector industrial el 10% restante, aunque estas cifras varían dependiendo de la zona en estudio (CNA, 2006). En la agricultura el sistema de riego más utilizado es el de agua rodada, riego por gravedad o riego superficial el cual tiene una eficiencia en el aprovechamiento del agua, en el mejor de los casos, del orden de 70%, aunque a nivel nacional lo más común es que los agricultores obtengan un



aprovechamiento de entre el 30 y el 40% e incluso menor, del agua total suministrada o extraída de las fuentes de abastecimiento –presa, río, lago o acuífero- (CNA, 2003). El resto del agua aplicada se pierde tanto por infiltración en el suelo como por evaporación.

Esto es de particular interés en las regiones del Centro y Norte del país en donde se localizan las zonas industriales, poblacionales y de cultivo más grandes e importantes, ya que en esos sitios las lluvias resultan mas bien escasas e irregulares por lo que en caso de emplearse el riego se necesitan mayores volúmenes y frecuencias de aplicación, siendo el uso del agua mayor y su disponibilidad natural sensiblemente constante.

Ahora bien, siendo la agricultura el principal consumidor de agua en el país y al tener eficiencias de aplicación tan bajas que ocasionan un gran desperdicio del recurso, desde hace algunos años varias empresas distribuidoras han venido ofreciendo en distintos lugares y foros un producto químico llamado poliacrilamida (PAM) y comercialmente distribuido con nombres como “lluvia seca”, “hidrogel”, “agua sólida”, entre otros, el cual podría ayudar a hacer un uso más eficiente del agua en el sector disminuyendo los volúmenes empleados y la frecuencia del riego.

Algunas de las ventajas que proporciona este producto son: lograr una absorción de 300 a 500 veces su peso de agua, retención de la humedad hasta por 6 meses con un buen almacenaje, disponibilidad del 90% del agua absorbida por los cristales para las plantas, absorción de fertilizantes, hormonas, plaguicidas, una vida útil de 7-10 años, según datos de la Empresa Es Vida Inc., la Comercializadora Internacional México, la Empresa SNF Floerger, entre otras.

Cuenta con un rango de absorción amplio, ya que puede emplearse en líquidos con niveles de pH que van desde 4.5-7.5, sin que esto afecte en forma sensible la capacidad de absorción. También se mantiene estable en su conformación en temperaturas de hasta 95°C y puede seguir absorbiendo agua a temperaturas de hasta 5°C. Por otro lado, se encontró que la temperatura no afecta la capacidad de absorción de la PAM pero sí su velocidad en una relación inversa, es decir, a mayor temperatura, menor el tiempo para lograr su máxima capacidad de absorción (Nissen y cols., 1997).

Sin embargo, a pesar de lo interesante que resultan los datos anteriores y que podrían dar lugar a un importante ahorro de agua en la producción agrícola, el uso del producto no se ha generalizado en este sector no obstante la promoción que se ha hecho de él en distintos foros y los ofrecimientos directos a los productores, por lo que su empleo actual se ve restringido a invernaderos, cultivos hidropónicos, las macetas y la decoración.

Por tal motivo, el presente trabajo se propuso estudiar el comportamiento hidrodinámico de la PAM para determinar si el motivo de la aparente renuencia de los productores agropecuarios a emplearlo se debe a que no obtienen resultados similares a los reportados por las empresas productoras.

Así, primeramente se realizaron una serie de pruebas para conocer la capacidad de absorción del polímero solo, empleando agua destilada (desmineralizada) y después utilizando agua con diferentes cantidades y tipos de sales disueltas; a continuación se hizo un prueba de evaporación (sólo para el caso en que se utilizó agua destilada) para conocer la resistencia a la pérdida de humedad de los cristales de PAM hidratados.

A continuación, se repitieron las pruebas de absorción y evaporación del polímero con agua destilada pero agregando esta vez un sustrato (arena) para conocer su comportamiento bajo condiciones de trabajo más realistas. Finalmente, se llevó a cabo un estudio sobre el costo y la cantidad de PAM a emplear con diferentes opciones de aplicación para de esta forma estimar, tanto técnica como económicamente, la factibilidad de aplicación de la PAM en la agricultura de riego.

## 2. ANTECEDENTES

La poliacrilamida (PAM) fue descubierta a mediados de los años 50 del siglo pasado y utilizada en un primer momento para absorber líquidos en los pañales desechables. Posteriormente se le hicieron algunos cambios a la fórmula original del polímero, que consistieron en sustituir el ión sodio por el ión potasio, para poder utilizarlo en la agricultura.

Entre los años 80 y 90 la PAM se comenzó a emplear en algunos países del Cercano Oriente, como Israel, en ciertos cultivos de invernadero e hidropónicos como una opción para lograr un mejor aprovechamiento del agua disponible. Por estos mismos años se comenzó a usar en algunos países de Europa y Sudamérica, como Francia, Alemania y Argentina, y en los Estados Unidos para la recuperación de suelos dañados y erosionados por malas prácticas agrícolas y/o condiciones ambientales (Empresa SNF Floerger).

La biografía disponible sobre el tema resulta más bien escasa y presenta variaciones en las principales características útiles de la PAM, mismas que dependen de la fuente consultada, aunque se pone especial énfasis en la capacidad de absorción del polímero, dando valores que fluctúan de 300 a 500 veces su peso en agua y periodos de vida útil de entre 7 y 10 años. Igualmente, hay datos sobre beneficios en el incremento de la capacidad de infiltración del agua en el suelo, la reducción y control de la erosión, disminución de la compactación y estabilización de la estructura del suelo, en especial para aquellos donde se aplica el riego.

Existen estudios sobre la aplicación de la PAM en diversos tipos de granos como el trigo, la soja, las hortalizas y el maíz en los cuales se enumeran los beneficios obtenidos en los cultivos pero pocas veces se mencionan el tipo de suelo empleado en el estudio; en ellos la forma de aplicación más común es colocando los cristales sobre el suelo y exceptuando los estudios realizados por Nissen, no hay información respecto a las consecuencias que la temperatura, la presión, la presencia de sales y el tamaño de los cristales del polímero pueden tener en la absorción.

Además, sólo en el reporte hecho por Laosheng Wu hay información respecto a que la poliacrilamida no puede conservar el agua absorbida; aunque no presenta cifras sobre la velocidad con que se pierde esta agua.

Así, dado la disparidad en cuanto a las cifras disponibles, las lagunas que presenta la información sobre los beneficios que se podrían obtener y los aspectos que podrían dificultar la obtención de éstos por parte del polímero, el presente trabajo estudió el comportamiento de la PAM someténdola a pruebas de absorción empleando agua con y sin sales, verificando su resistencia a la evaporación y observando su capacidad de absorción y retención de agua al estar mezclada de diferentes formas,

con un tipo de suelo tratando que éstas reflejaran de una forma lo más apegada posible las condiciones a las que estaría sometida de emplearse en la agricultura de riego.

Posteriormente, un estudio estadístico de los resultados obtenidos nos permitió tener una certeza mayor respecto a la variación de los volúmenes de agua absorbidos por las diferentes pruebas, especialmente de aquellas equivalentes entre sí, como las realizadas con arena y a las que se agregó el polímero de diferentes formas en cada una de ellas.

Finalmente, se hizo un estudio financiero para conocer su factibilidad de aplicación ya que este punto se trata de forma muy superficial en las fuentes consultadas, empleando datos y precios de Estados Unidos.

### **3. OBJETIVO**

#### **3.1. Objetivo General**

Estudiar el comportamiento hidrodinámico de la PAM para su posible uso en la agricultura de riego.

#### **3.2. Objetivos Particulares**

- Determinar la capacidad de absorción del agua de la PAM sola y mezclada con suelo arenoso.
- Observar la resistencia a la evaporación del agua absorbida por parte de la PAM sola y mezclada con suelo arenoso.
- Calcular las posibles cantidades necesarias por aplicar y los costos de la PAM en la agricultura.

#### 4. METODOLOGÍA

Primero, se realizaron una serie de pruebas de absorción para comprobar que los cristales de PAM realmente cumplieran con los parámetros indicados por los distribuidores y fabricantes. Así, a siete vasos de precipitados se les colocaron, por separado, cierta cantidad de alguna de las dos presentaciones del polímero (grano fino y grano grueso) que se analizaron; se les añadieron diferentes volúmenes de agua destilada a cada uno de ellos, desde 100 a 700mL.

Después de dejar transcurrir los periodos de contacto estimados para cada prueba, se determinó el volumen de agua sin absorber filtrando el contenido de los vasos de precipitados y midiendo el agua resultante en cada caso, se calculó el agua retenida por los cristales de polímero en cada una de las pruebas de absorción hechas.

A continuación, se realizó una prueba de evaporación para estimar la resistencia de los cristales de PAM a perder el agua absorbida bajo condiciones ambientales. Para ello, se colocaron los cristales hidratados obtenidos de las pruebas de absorción en charolas de unicel, y sus pérdidas de humedad se contrastaron con las de un volumen equivalente de agua que sirvió como testigo. Esta prueba se hizo con ambos tipos de polímero y terminó hasta que se evaporó toda el agua contenida en los cristales.

Posteriormente, se hizo una prueba de absorción con sales para observar las afectaciones que la presencia de estos solutos en el agua ocasionaban en la capacidad de absorción de la PAM.

En la siguiente prueba, se analizó la capacidad de absorción y retención de agua de la PAM fina mezclada con arena para observar las afectaciones que el polímero tendría en sus propiedades al competir con un sustrato por el agua, así como para determinar si la mezcla de estos dos elementos tendría una mayor resistencia a la evaporación de la que podrían tener por sí solos.

Finalmente, se llevó a cabo un estudio financiero para decidir la factibilidad económica de aplicar la PAM en grandes terrenos como los utilizados en la agricultura de riego, tomando como referencia los resultados conseguidos en las pruebas anteriores.

La decisión de emplear agua destilada en todas las pruebas se tomó porque, en su información, se aclara que los mayores volúmenes de absorción que puede lograr la PAM se consiguen con agua destilada o con agua baja en sales y solutos. De esta forma, en todas las pruebas, se trató de dar al polímero las mejores condiciones para optimizar su desempeño.

## 4.1. Análisis de la capacidad de absorción y retención de agua de la poliacrilamida (PAM) sola

### 4.1.1. Pruebas de absorción con polímero de grano fino y de grano grueso

Los materiales y equipos que se utilizaron fueron:

<b>Material</b>	<b>Equipo</b>
PAM de grano fino y grueso	Balanza analítica de 250g y precisión de 0.001g
7 vasos de precipitados de 1000ml	Balanza analítica de 3,000g y precisión de 0.1g
Etiquetas de papel	Bureta electrónica de 50ml
Agua destilada	Termómetro

Para realizar las pruebas se colocó 1g del polímero correspondiente (fino o grueso) en todos los vasos de precipitados; se añadieron cantidades ascendentes de agua por centenas desde 100 hasta 700ml dando a las pruebas un tiempo de contacto variable desde 20min hasta 180min, dependiendo de la cantidad de agua añadida en cada caso, para conocer su capacidad de absorción.

La razón de emplear gramos de polímero y mililitros de agua en esta prueba, se debe a que los datos proporcionados por los fabricantes y distribuidores se muestran en litros de agua absorbida por kilogramo de PAM, lo que sería poco práctico de reproducir en el laboratorio. Así, se decidió emplear la milésima parte de la cantidad de polímero y de agua especificados en la información, para poder hacer las pruebas arriba señaladas manteniendo la misma relación de absorción entre ambas partes.

### 4.1.2. Determinación de agua sin absorber

Para realizar esta prueba se necesitó:

<b>Material</b>	<b>Equipo</b>
PAM hidratada de las pruebas anteriores	Balanza analítica de 3,000g y precisión de 0.1g
6 embudos de filtración	Termómetro
6 matraces Erlenmeyer de 500mL	
Papel filtro	

Una vez concluidas todas las pruebas de absorción, se procedió a determinar el volumen de agua sin absorber en cada una de ellas vaciando todo el contenido de los vasos en los embudos de filtración, los cuales tenían un papel filtro en su interior, y colocando todo el conjunto dentro de un matraz Erlenmeyer (Fig. 29-31). La determinación del agua sin absorber se hizo por diferencia de pesos y se

llevó a cabo hasta que esta diferencia en los matraces fue de 0.3-0.5g en al menos dos pesadas consecutivas. Las lecturas del peso se tomaron cada 24hr. junto con la lectura de la temperatura ambiente.

#### 4.1.3. Prueba de evaporación

Para esta prueba se utilizó:

<b>Material</b>	<b>Equipo</b>
PAM hidratada y drenada de la prueba anterior	Balanza analítica de 250g y precisión de 0.001g
8 charolas de unigel de 22x15cm	Termómetro
Agua	

Para observar el comportamiento de la capacidad de retención de agua y su evaporación por parte del polímero, se utilizaron charolas de unigel en las que se colocaron cantidades iguales en peso de la PAM hidratada, después de determinar el agua sin absorber en todas las pruebas y tomando como base el peso de la PAM de la prueba 1:100 (figuras 32-35), se comparó su pérdida de humedad a temperatura ambiente contra la evaporación de un volumen equivalente en peso de una lámina de agua bajo las mismas condiciones.

Igualmente, la determinación de la pérdida de humedad en las pruebas se realizó por diferencia de peso de las charolas, tomando mediciones cada 24hr. hasta que dicha diferencia no fue mayor de 0.001-0.004g en dos pesadas consecutivas.

#### 4.1.4 Prueba de absorción de la PAM con sales de $MgSO_4$ , $K_2SO_4$ y $NaCl$

En las pruebas de absorción se usaron:

<b>Material</b>	<b>Equipo</b>
PAM de grano fino	Balanza analítica de 250g y precisión de 0.001g
Sales de $MgSO_4$ , $K_2SO_4$ y $NaCl$	Potenciómetro
4 vasos de precipitados de 250 ó 600mL	Bureta electrónica de 50mL
6 vasos de precipitados de 1000mL	
Etiquetas de papel	
Agua destilada	

y para determinar el agua sin absorber se necesitaron:



**Material**

PAM hidratada de la prueba anterior  
6 embudos de filtración  
6 matraces Erlenmeyer de 500ml  
Papel filtro

**Equipo**

Balanza analítica de 3,000g y precisión de 0.1g  
Termómetro

Este análisis se realizó debido a que en la literatura se reporta un fuerte descenso sobre la capacidad de absorción de la PAM conforme se incrementa la cantidad de sal(es) disuelta(s) en el agua. Algunas de las alteraciones reportadas por la presencia de sal o sales se muestran a continuación, en volumen de agua absorbida (litros) por peso(kg) de PAM:

Agua limpia o destilada ----- 500 ℓ/kg	Agua municipal ----- 400-450 ℓ/kg
Agua mineral o de manantial ---- 200 ℓ/kg	Agua de mar ----- 40-60 ℓ/kg
Agua con 1g/L de sal ----- 150-200 ℓ/kg	Agua con 4g/l de sal ---- 90 ℓ/kg

Los aniones más comunes presentes en el agua, de acuerdo a su cantidad, son cloruros, sulfatos, carbonatos y bicarbonatos, y entre los cationes más comunes están el calcio, el magnesio, el potasio y el sodio, por lo que se decidió preparar una serie de soluciones empleando tres tipos de sal que presentaran los cationes y/o aniones antes mencionados. Las sales seleccionadas fueron el  $MgSO_4$ , el  $K_2SO_4$  y el  $NaCl$  y las pruebas se hicieron para conocer de una forma más exacta el comportamiento de la absorción en la PAM bajo condiciones de trabajo más realistas.

Para realizar esta prueba se tomaron como base los resultados conseguidos en las pruebas de absorción de 1:100 y 1:200, realizadas anteriormente con la PAM en su presentación de grano fino y agua destilada. La razón de esta decisión fue que estas pruebas tuvieron el mejor desempeño durante el citado análisis ya que absorbieron 100 y 196.36ml respectivamente del agua agregada, contra los 100 y 158.6ml absorbidos por la presentación de grano grueso.

Por otro lado, se prepararon diferentes soluciones con las sales de  $K_2SO_4$ ,  $MgSO_4$  y  $NaCl$  con conductividades de 2mS (micro Siemens) la cual representa la cantidad de sal(es) contenida en un agua para riego con fertilizantes en fertirriego o en un suelo de muy buena calidad; de 4mS que equivalen a la cantidad de sal(es) presentes en suelos cultivados considerados no salinos y de 8mS que equivalen a suelos y/o aguas con altos contenidos de sal(es) y aptos sólo para los cultivos más resistentes. Se hicieron tres soluciones, una para cada conductividad arriba mencionada, trabajando con volúmenes de 100 y 200ml de agua cada vez.

A continuación, a los seis vasos de precipitados con capacidad de un litro se les colocó 1g de PAM, uno para cada concentración de sal, se agregaron en ellos las soluciones arriba especificadas y se

dejó transcurrir un periodo de absorción igual al determinado en las pruebas anteriores con agua destilada de 20 y 40min. respectivamente. Una vez transcurrido ese tiempo, la PAM hidratada se colocó en los embudos provistos con papel filtro, se colocaron dentro de los matraces Erlenmeyer, se dejaron drenar hasta que no hubo cambios significativos en sus pesadas y mediante la diferencia de sus pesos se calculó el agua sin absorber que quedó en cada una de las pruebas.

#### **4.2. Análisis de la capacidad de absorción y retención de agua de la PAM fina mezclada con arena**

En las pruebas de absorción y retención de agua de la PAM mezclada con suelo se emplearon:

<b>Material</b>	<b>Equipo</b>
PAM de grano fino	Balanza analítica de 250g y precisión de 0.001g
Arena	Balanza analítica de 6,000g y precisión de 1g
Agua destilada y agua potable	Balanza analítica de 3,000g y precisión de 0.1g
12 botes de plástico transparente de 3.5ℓ y fondo plano	Taladro y broca de ¼"
12 hieleras de plástico de 1ℓ	Tamiz de pruebas físicas para suelo de 2mm
Malla mosquitera de plástico	Termómetro
12 Piezas de gasa de algodón de 10x10cm	
Marcador de tinta indeleble y regla de 30cm	

Primero, a todos los botes de plástico se les recortó la parte superior hasta dejar sólo la parte recta de sus paredes; después se les hicieron marcas por la parte interna de las paredes hasta una altura de 15cm, ya que a esa profundidad normalmente se trabajan los suelos agrícolas; a continuación se hicieron una serie de agujeros (12) en el fondo de los botes con el taladro y la broca de ¼" para permitir el drenado del agua. Posteriormente se tomaron 12 etiquetas y se marcaron por tercias de la siguiente forma: Testigo (T), PAM arriba, PAM abajo y PAM mezclada.

Después se recortaron la gasa y la malla mosquitera en forma circular a la medida del diámetro de los botes y se colocaron en el fondo de los botes en el siguiente orden: primero la gasa sobre el fondo del bote, después la malla sobre la gasa, se les colocaron las etiquetas y se pesaron.

El siguiente paso consistió en tamizar el arena usando la malla de 2mm y llenar los botes con esta arena hasta la marca de los 15cm; el arena queda retenida entre la gasa y la malla por la presión que su propio peso ocasiona, lo que impide que salga por los agujeros del fondo.

Para realizar esta prueba se seleccionó la PAM en su presentación fina por ser la que en la prueba de absorción anterior obtuvo el mejor resultado (353.2ml) y, tomando como base una de las especificaciones para la aplicación de la PAM del distribuidor (Empresa Es Vida) que recomienda aplicar 3g del polímero por cada 1,000ml de sustrato, se hicieron los cálculos correspondientes y se obtuvo que para el volumen de trabajo de los botes eran necesarios aproximadamente 8g de PAM.

Una vez que los 12 botes estuvieron llenos con arena, se pesaron y se les hicieron las siguientes adecuaciones: a tres de los botes no se les hizo ningún cambio (testigos); a tres botes se les sacó la mayor parte del arena dejando aproximadamente 2cm de arena en el fondo, se agregaron 8g de PAM a cada uno de ellos esparciéndolos bien sobre el arena, se volvieron a llenar con el arena extraída y se pesaron nuevamente (PAM abajo); a otros tres botes se les sacó parte de la arena de la parte superior hasta dejar un espacio de aproximadamente 2cm por debajo de la marca de los 15cm, se les colocaron y esparcieron bien 8g de PAM a cada uno de ellos e igualmente se volvieron a llenar y a pesar (PAM arriba); a los tres botes restantes se les sacó toda el arena contenida de forma individual y se mezcló en cada ocasión perfectamente con 8g de PAM, posteriormente el arena mezclada fue devuelta a los botes y éstos se pesaron nuevamente (PAM mezclada).

Por otro lado se tomaron 12 recipientes de plástico (hieleras), se pesaron y los botes con arena se colocaron dentro de ellos. Posteriormente se añadió agua destilada en porciones de 500ml, medidos por peso, con la ayuda del vaso de precipitados de 600ml a cada uno de los botes. El agua se continuó agregando hasta que los botes comenzaron a drenar el agua por el fondo. También se colocó otro recipiente con solo agua para determinar la evaporación sufrida tanto por este recipiente como por los botes del experimento y poder comparar la capacidad de retención de agua de la PAM.

### **4.3. Costos y cantidades a emplear de la PAM**

Para realizar el cálculo del costo de emplear la PAM para mejorar la capacidad de absorción y retención de la humedad en el suelo, se tomó como punto de referencia la prueba con la PAM y el arena mezclados porque, a pesar de que no fue la prueba con la mayor capacidad de absorción de agua, su comportamiento en el suelo indica que a la larga esta forma de aplicación nos puede ofrecer mejores resultados.

Para hacer esta afirmación se considera que en las otras pruebas el agua absorbida por la PAM se encuentra fuera del alcance, resulta poco aprovechable para las raíces de las plantas o presenta una gran superficie de evaporación que incrementa las pérdidas de humedad (PAM en la parte superior); o porque debido a la presión ejercida por el suelo sobre los cristales de PAM, la cantidad de agua

absorbida por ellos no resulta significativa comparada con el volumen absorbido por el suelo (PAM en la parte inferior).

De esta forma, al estar los cristales de PAM distribuidos de una forma más homogénea en todo el volumen de arena, el agua absorbida estuvo en contacto durante un tiempo mayor con estos cristales y si bien la presión ejercida por el suelo no permitió una mayor absorción en los cristales de las capas inferiores de las macetas, como sucedió en la prueba con la PAM abajo, esta diferencia fue compensada en parte por los cristales de las capas superiores que no se vieron tan afectados por esta situación.

Por otro lado, entre las recomendaciones que se hacen para el buen uso del polímero se considera que no debe ser expuesto a los rayos directos del sol, los cuales resultan perjudiciales para la PAM ya que son capaces de romper las cadenas de la poliacrilamida acelerando su degradación. Esto descarta la opción de reutilizar durante mucho tiempo la PAM en los 2cm superiores del suelo.

Ahora bien, para obtener el costo de aplicar la PAM se analizaron tres situaciones. Una en la que su aplicación se realiza mezclando el polímero con todo el suelo que forma el surco (situación más desfavorable); otra en la que se aplica se realiza sólo en la parte central del surco en un volumen de 0.3m de ancho, 0.3m de profundidad, por los 100m de longitud del surco (situación medianamente favorable) y finalmente, aplicándolo en macetas tal como lo recomienda el productor para este caso (situación más favorable).

Para poder realizar los cálculos se hicieron las consideraciones siguientes. Primero, que el tipo de suelo del campo de cultivo es similar al que se utilizó para las pruebas de absorción y evaporación de la PAM con suelo descritas anteriormente. Segundo, dado que la densidad relativa del arena es de  $1.4\text{gr/cm}^3$  podemos pensar que 1ℓ de arena es equivalente a 1.4kg.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Pruebas de absorción con polímero de grano fino

En las siguientes figuras se muestra el aspecto que el polímero adquirió a lo largo de las distintas pruebas y se indican las principales características observadas en ellas.

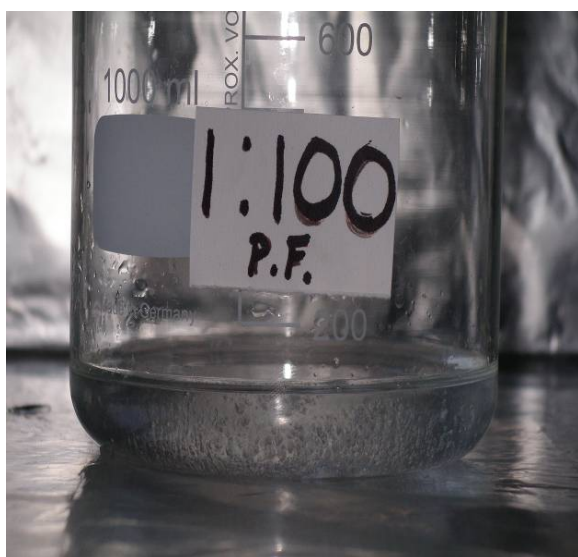


Figura 1. Prueba de hidratación PAM fina

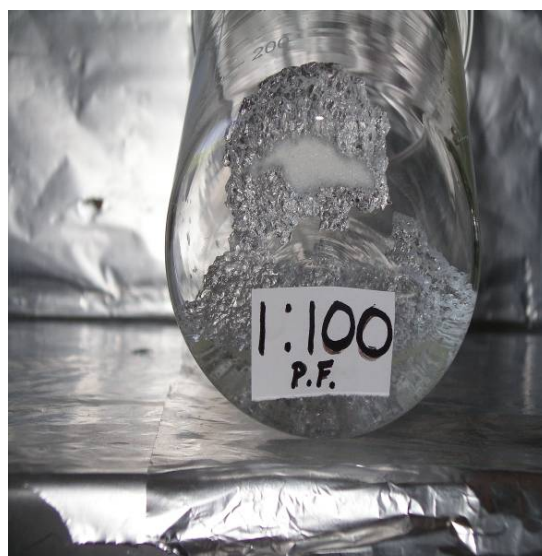


Figura 2. Aspecto de la PAM en hidratación total

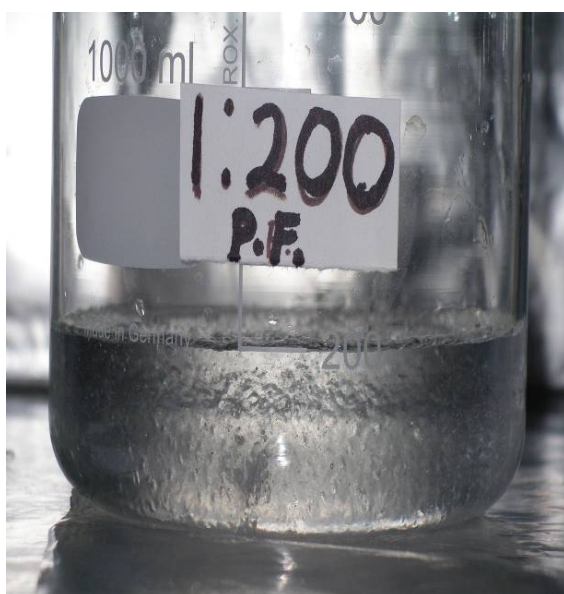


Figura 3. Prueba de hidratación PAM fina



Figura 4. Aspecto de la PAM en hidratación total



Figura 5. Prueba de hidratación PAM fina

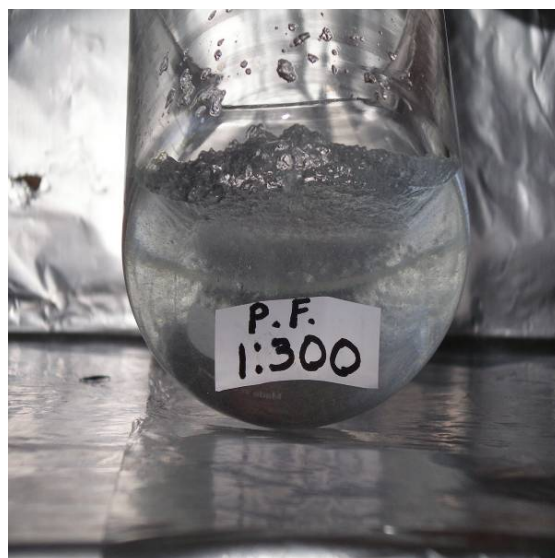


Figura 6. Aspecto de la PAM en hidratación total

En las figuras 2, 4 y 6 se observa que al finalizar la prueba quedó en el fondo del vaso cierta cantidad de cristales de polímero sin hidratar, misma que se fue reduciendo al aumentar el volumen de agua agregado. Así, la prueba 1:100 tuvo una gran cantidad de cristales; en la prueba 1:200 su número fue menor que en la prueba anterior y finalmente, en la prueba de 1:300 los cristales sin hidratar fueron muy pocos.

Las figuras 1, 3 y 5 muestran el aspecto de “gelatina” que adquirió la PAM en estas pruebas y cabe señalar que, si se dejan en contacto un tiempo mayor, todos los cristales terminan por absorber cierta cantidad de agua que les hace cambiar su aspecto inicial de un cristal opaco y pequeño a un cristal traslúcido de mayor tamaño y de aspecto sólido. Aparentemente, la absorción del agua fue completa en todos los casos.

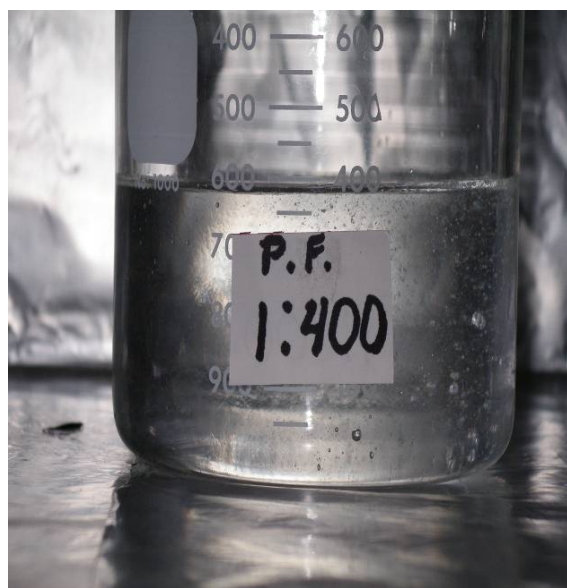


Figura 7. Prueba de hidratación PAM fina



Figura 8. Aspecto de la PAM en hidratación total

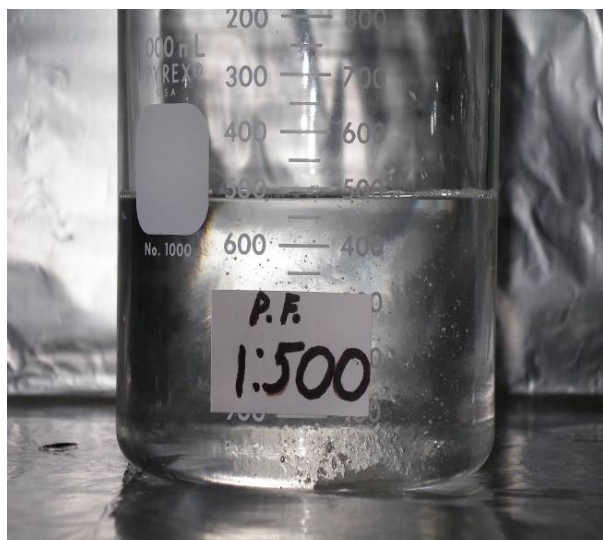


Figura 9. Prueba de hidratación PAM fina



Figura 10. Aspecto de la PAM en hidratación total

Las figuras 7-10 muestran el aspecto semisólido adquirido por los cristales de PAM para las pruebas 1:400 y 1:500, su hidratación fue total y se distribuyeron de forma homogénea en todo el volumen de agua. Se formaron pequeñas burbujas de aire en el interior de ellos y a simple vista no se apreciaba la existencia de agua sin absorber.

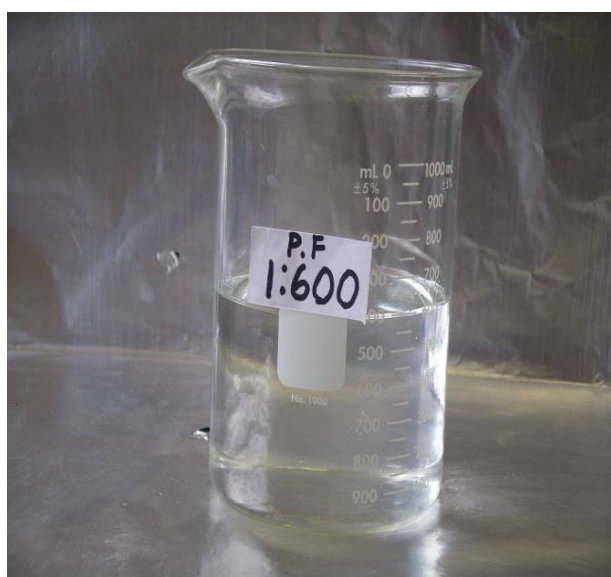


Figura 11. Prueba de hidratación PAM fina



Figura 12. Aspecto de la PAM totalmente hidratada

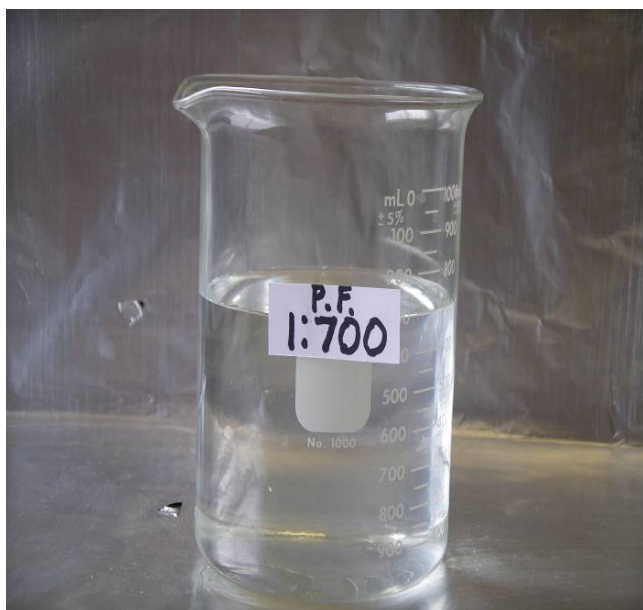


Figura 13. Prueba de hidratación PAM fina



Figura 14. Aspecto de la PAM en hidratación total

Las figuras 11-14 muestran el aspecto de los cristales de PAM en las pruebas de 1:600 y 1:700, en las que el exceso de agua añadida hizo que adquirieran una apariencia acuosa con los cristales distribuidos en forma homogénea en todo el volumen del líquido, destacando la existencia de agua sin absorber.

## 5.2. Pruebas de absorción con polímero de grano grueso



Figura 15. Prueba de hidratación PAM gruesa

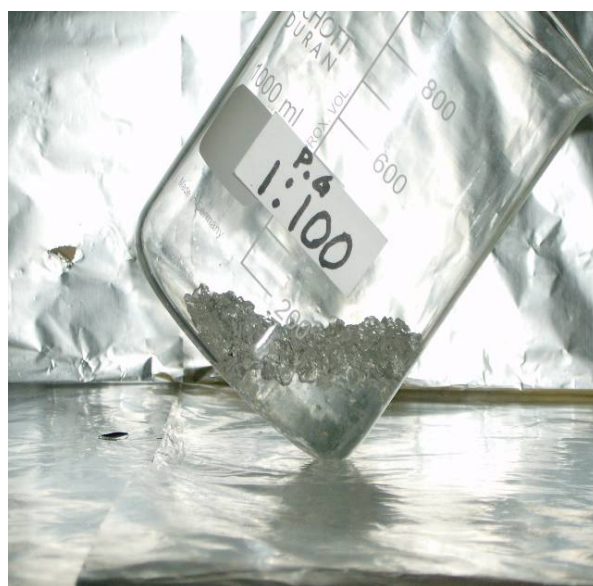


Figura 16. Aspecto de la PAM totalmente hidratada





Figura 17. Prueba de hidratación PAM gruesa



Figura 18. Aspecto de la PAM totalmente hidratada



Figura 19. Prueba de hidratación PAM gruesa



Figura 20. Aspecto de la PAM totalmente hidratada

Las figuras 15-20 muestran el aspecto y el tamaño que adquirieron los cristales de PAM al existir una hidratación completa de todos ellos y conforme se incrementó el agua añadida. Su apariencia era sólida y a partir de la prueba 1:200 (Fig. 17 y 18) comenzó a advertirse la presencia de agua sin absorber y en la prueba 1:300 (Fig. 19 y 20) se comenzaron a formar pequeñas burbujas en el interior de los cristales hidratados.

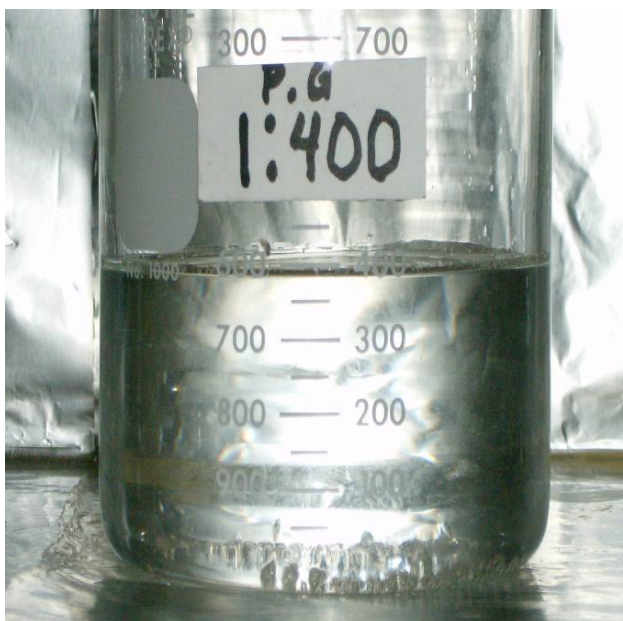


Figura 21. Prueba de hidratación PAM gruesa



Figura 22. Aspecto de la PAM totalmente hidratada



Figura 23. Prueba de hidratación PAM gruesa



Figura 24. Aspecto de la PAM totalmente hidratada

En las pruebas de 1:400 y 1:500 no se apreciaron mayores cambios respecto a las tres anteriores, excepto por un tamaño un tanto mayor de los cristales hidratados y la presencia de muchas pequeñas burbujas de aire dentro de los cristales hidratados. Hubo una gran cantidad de agua sin absorber en ambos casos (Fig. 22 y 24), lo que dio a las pruebas un aspecto completamente acuoso.

Por otro lado, las figuras 21 y 23 muestran la tendencia de los cristales a sedimentarse conforme aumentaba la cantidad de agua presente.

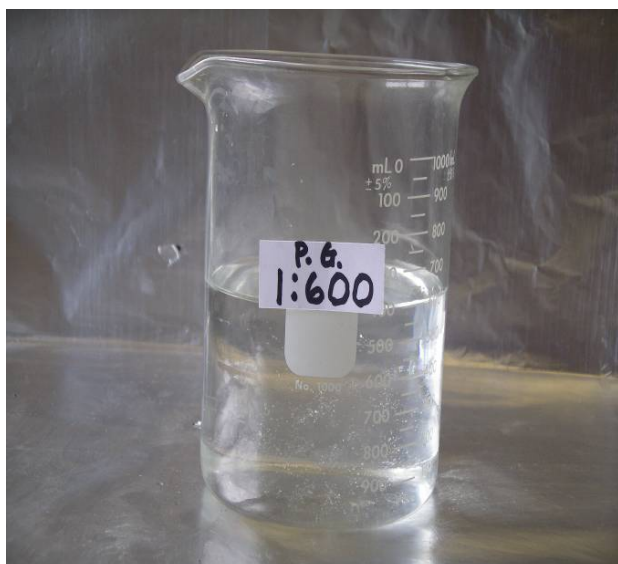


Figura 25. Prueba de hidratación PAM gruesa

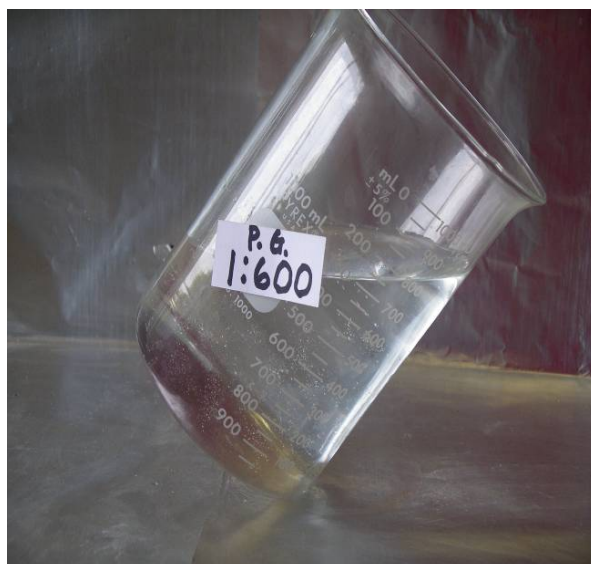


Figura 26. Aspecto de la PAM totalmente hidratada

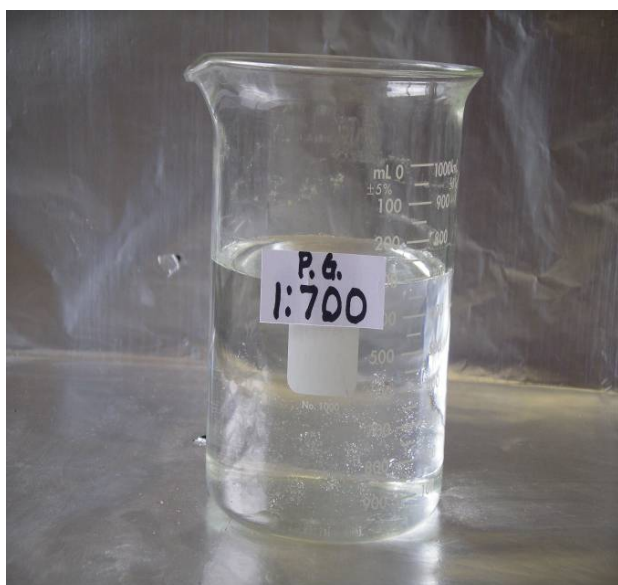


Figura 27. Prueba de hidratación PAM gruesa

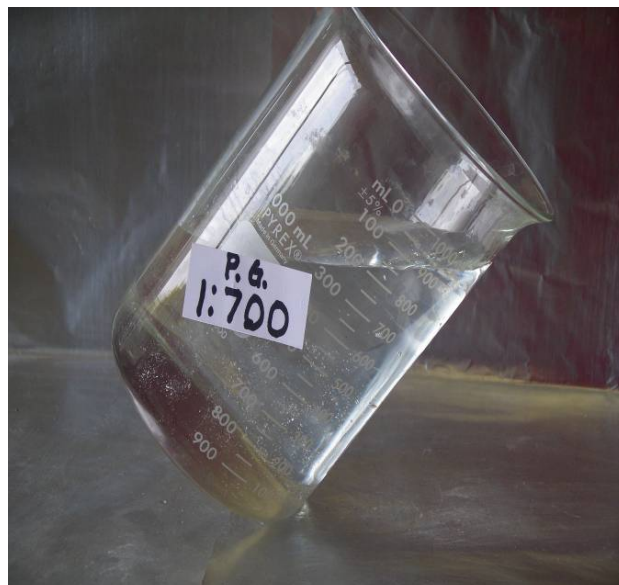


Figura 28. Aspecto de la PAM totalmente hidratada

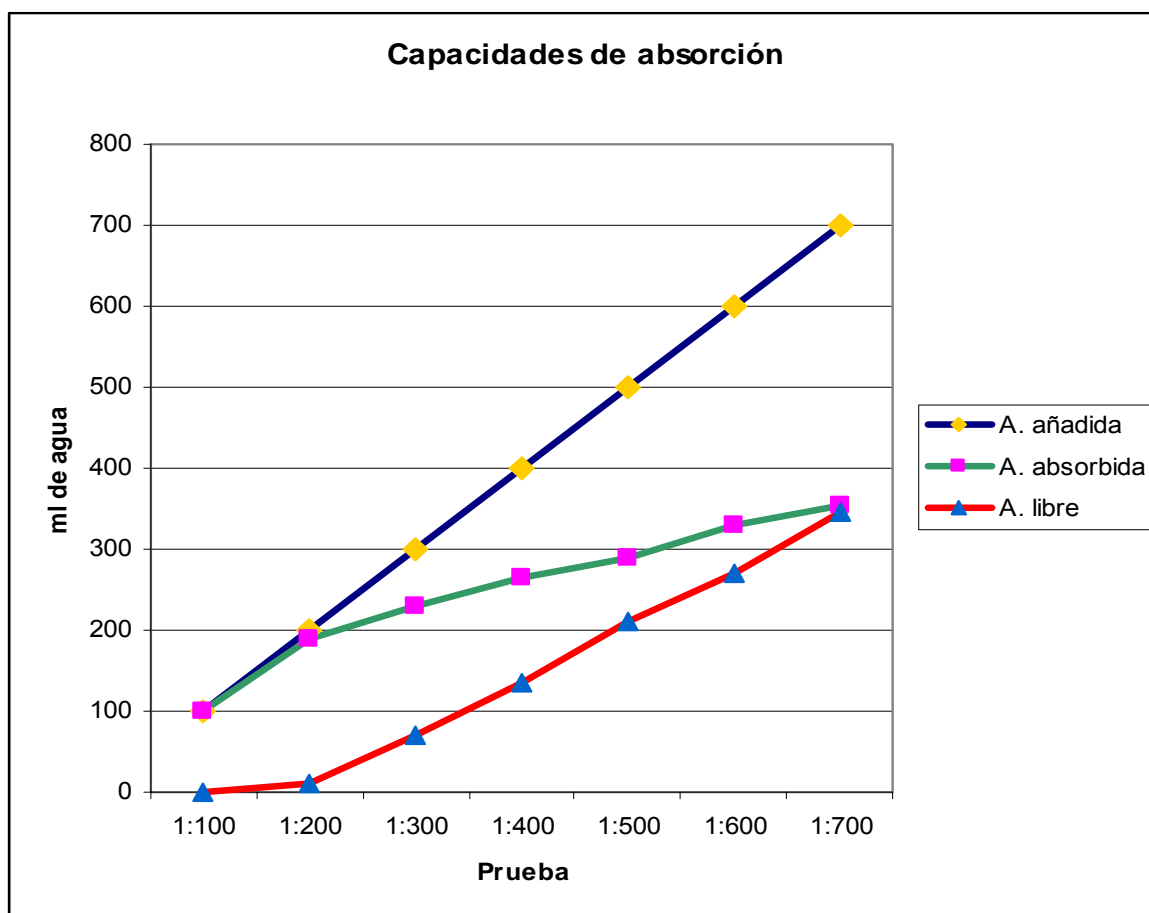
En las dos últimas pruebas, de 1:600 y 1:700, los cristales hidratados de PAM alcanzaron un tamaño ligeramente mayor que en la prueba de 1:500, pero su comportamiento y aspecto fueron los mismos en general. Las figuras 25-28 muestran claramente los cristales sedimentados y la gran cantidad de agua sin absorber en ambas pruebas.

### 5.3. Determinación del agua sin absorber por los cristales de PAM

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos en las diferentes pruebas de absorción realizadas y en la determinación del agua sin absorber para los cristales de PAM de grano fino analizados:

Prueba	Agua agregada	Hora de inicio	Hora de término	Agua absorbida (ml)	Agua sin absorber o agua libre (ml)	% de agua absorbida
1:100	100.09	13:27	13:48	100.09	0.0	100.0
1:200	200.05	13:25	14:06	188.35	11.7	94.18
1:300	300.02	13:21	14:28	230.42	69.6	76.81
1:400	400.05	13:12	14:36	265.15	134.9	66.3
1:500	500.06	13:03	15:15	290.36	209.7	58.07
1:600	600.03	12:51	15:58	331.03	269.0	55.17
1:700	700.00	12:38	15:43	<b>353.20</b>	346.8	50.46

Tabla 1. Agua absorbida y sin absorber por la PAM de grano fino

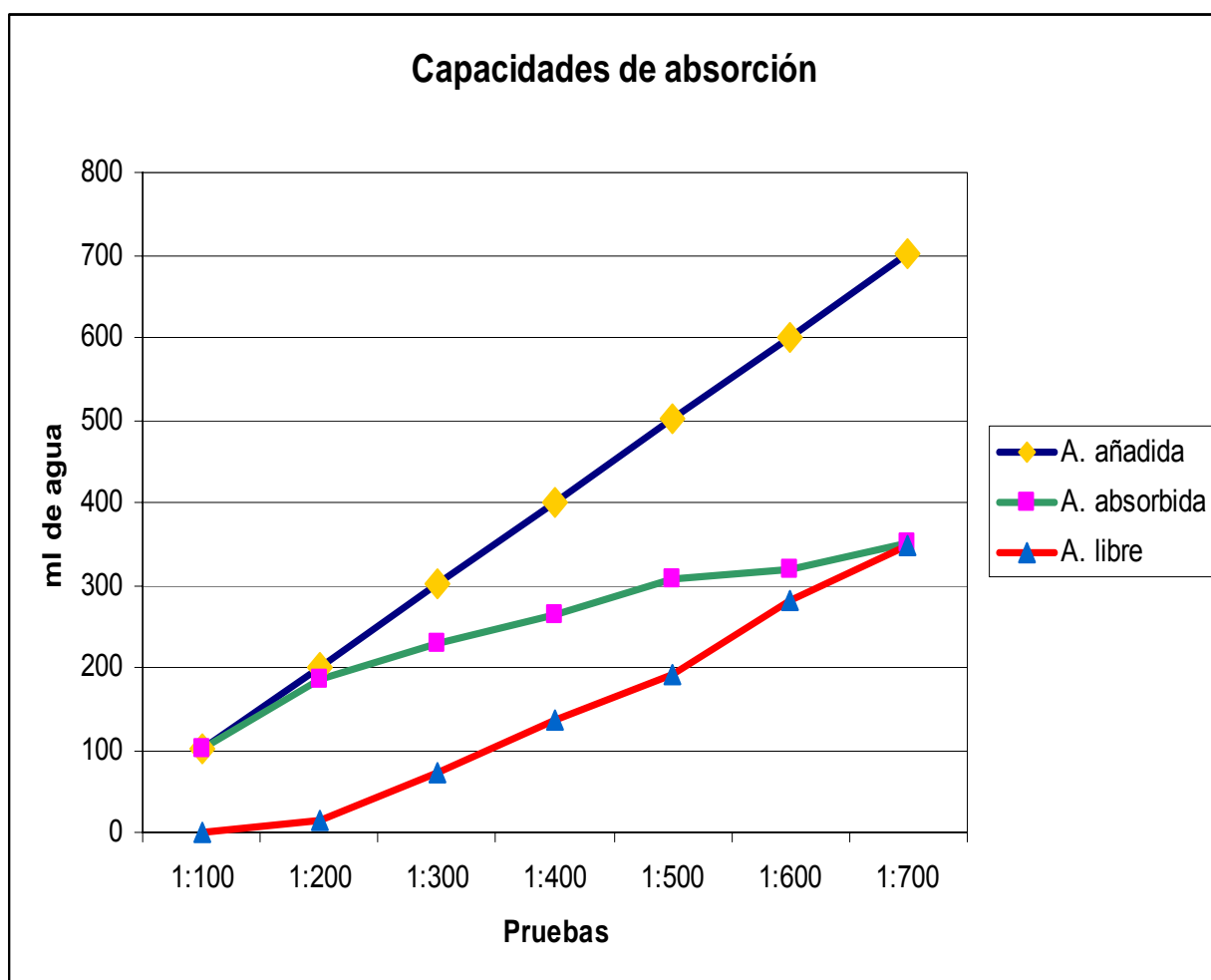


Gráfica 1. Resultados de absorción para la PAM de grano fino

Repetición de la prueba para confirmar los resultados obtenidos:

Prueba	Agua agregada	Hora de inicio	Hora de término	Agua absorbida (ml)	Agua sin absorber o agua libre (ml)	% de agua absorbida
1:100	100.01	11:53	12:15	100.01	0.0	100.0
1:200	200.00	11:51	12:32	185.8	14.2	93.0
1:300	300.07	11:47	13:00	227.97	72.1	76.0
1:400	400.04	11:40	13:15	263.04	137.0	65.75
1:500	500.01	11:33	13:36	308.21	191.8	61.64
1:600	600.07	11:20	14:23	317.47	282.6	52.91
1:700	700.01	11:08	14:10	<b>351.61</b>	348.4	50.23

Tabla 2. Resultados de la PAM de grano fino



Gráfica 2. Confirmación de los resultados de absorción para la PAM de grano fino

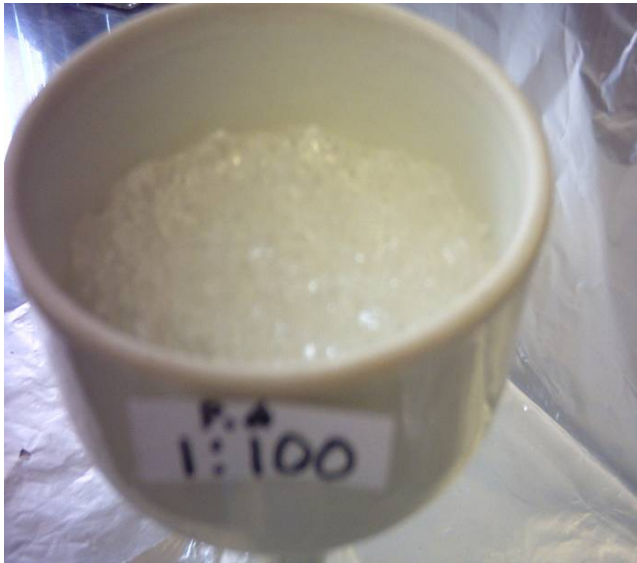


Figura 29

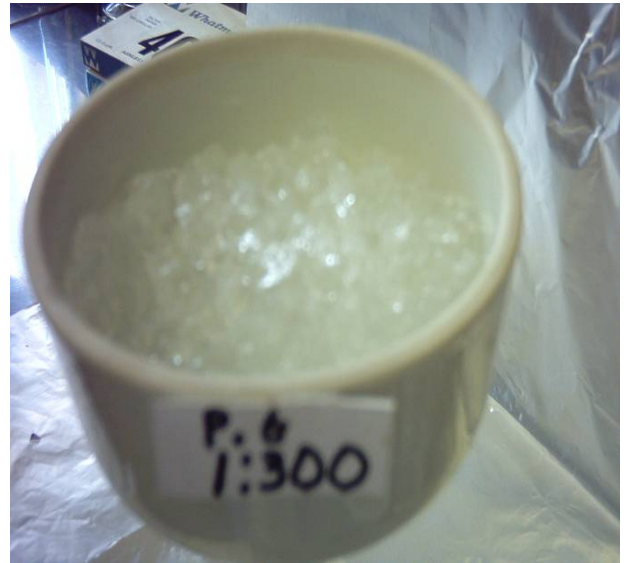


Figura 30

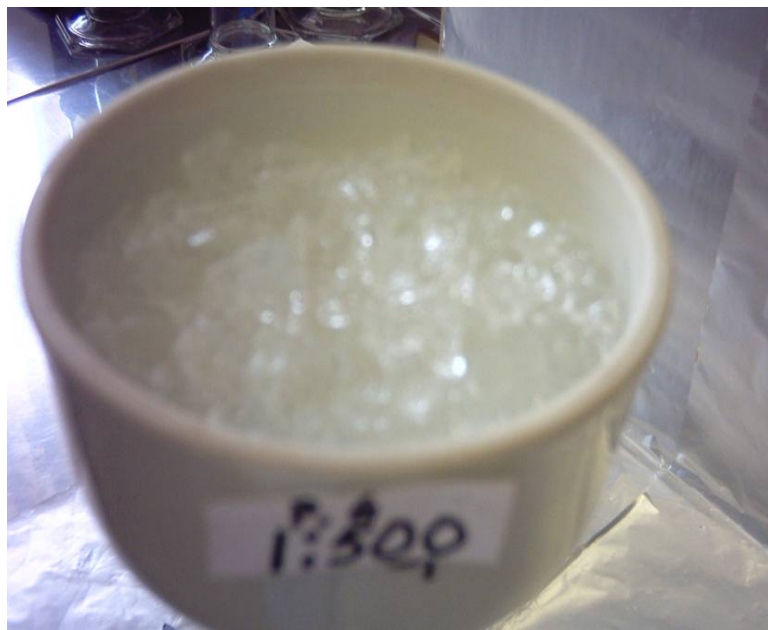


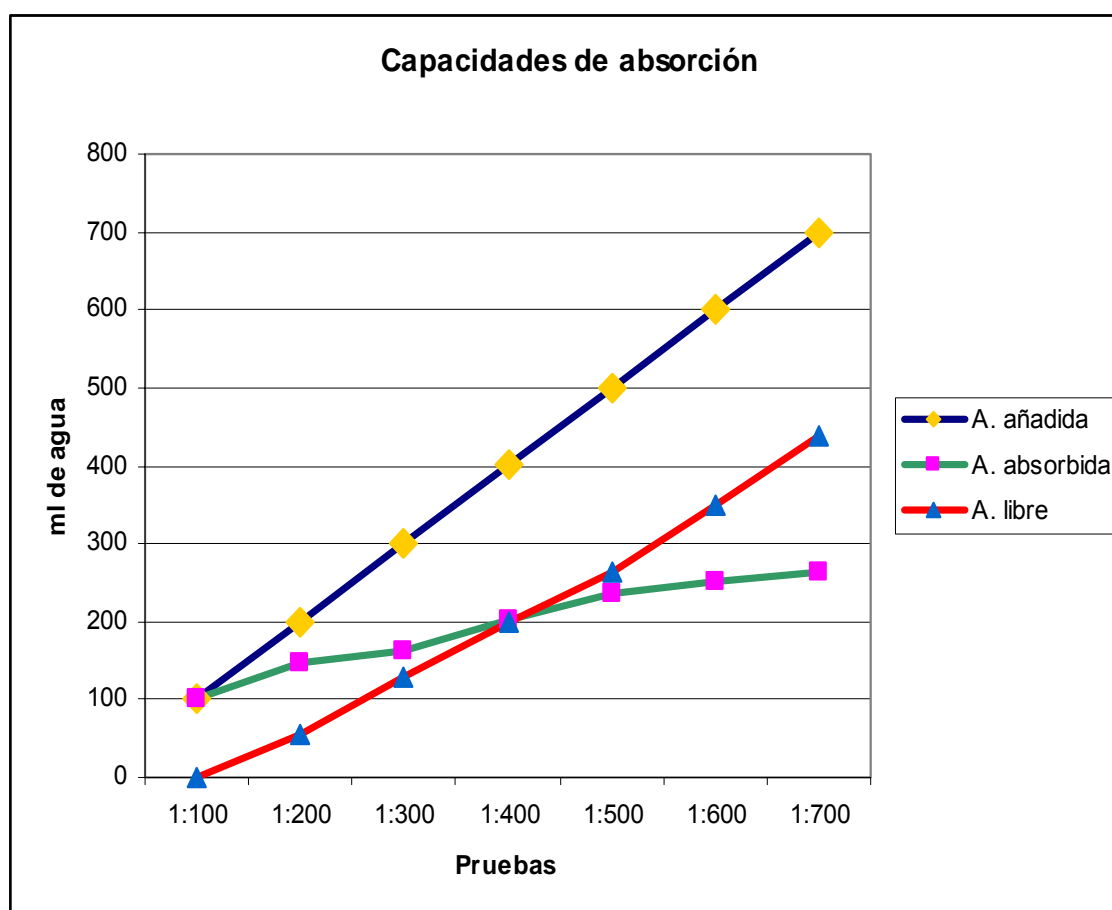
Figura 31

**Aspecto de la PAM hidratada y drenada usada para determinar el agua libre con diferentes pruebas**

Los resultados obtenidos en las pruebas de absorción y determinación de agua sin absorber con los cristales de PAM de grano grueso fueron:

Prueba	Agua agregada	Hora de inicio	Hora de término	Agua absorbida (ml)	Agua sin absorber o agua libre (ml)	% de agua absorbida
1:100	100.02	15:07	15:27	100.02	0.0	100.0
1:200	200.00	14:52	15:28	145.9	54.1	73.0
1:300	300.01	14:39	15:52	161.91	130.1	43.36
1:400	400.09	14:31	16:02	201.09	199.0	50.26
1:500	500.03	14:25	16:31	237.33	262.7	47.47
1:600	600.03	14:14	17:14	251.13	348.9	41.86
1:700	700.02	14:02	17:04	<b>263.12</b>	436.9	37.6

Tabla 3

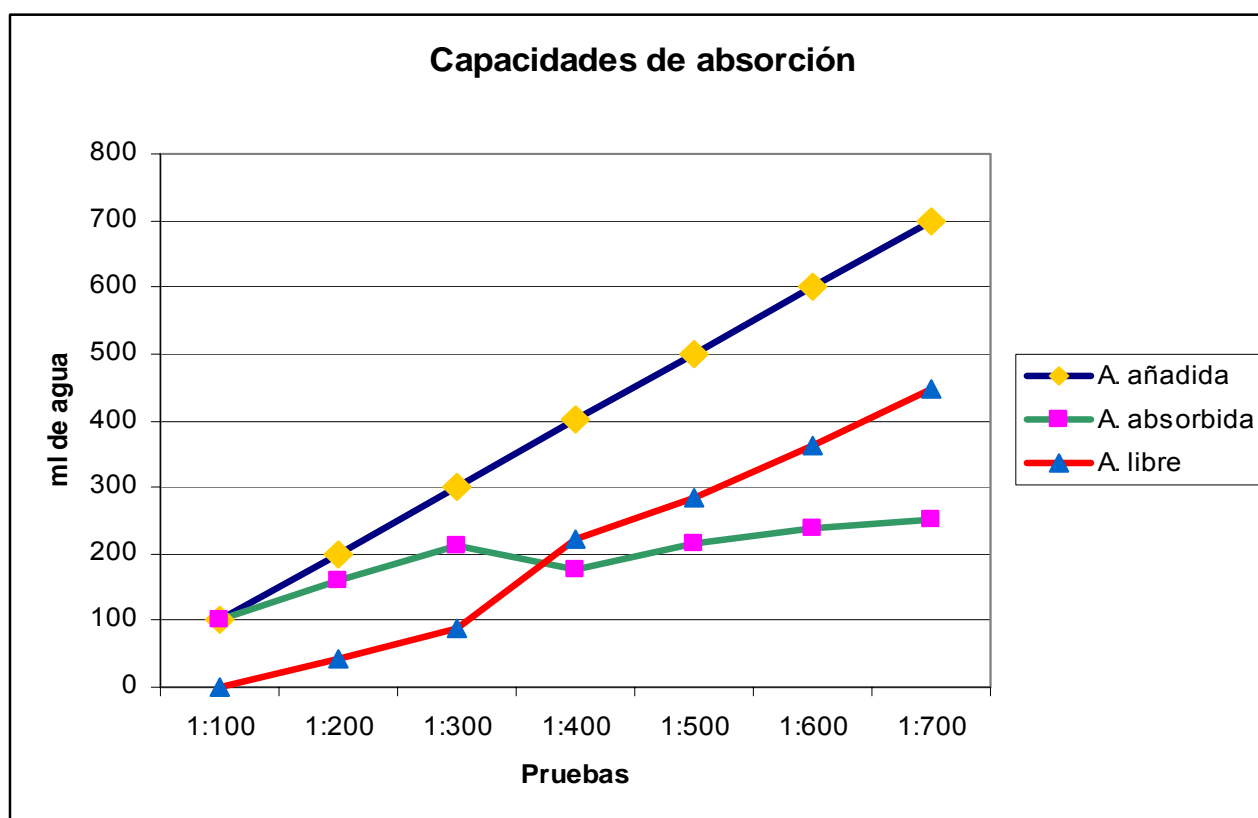


Gráfica 3. Resultados de absorción para la PAM de grano grueso.

Repetición de la prueba para confirmar los resultados obtenidos:

Prueba	Agua agregada	Hora de inicio	Hora de término	Agua absorbida (ml)	Agua sin absorber o agua libre (ml)	% de agua absorbida
1:100	100.02	16:11	16:37	100.02	0.0	100.0
1:200	200.00	16:06	16:57	158.6	41.4	79.3
1:300	300.05	15:57	17:18	210.65	89.4	70.22
1:400	400.02	14:00	15:31	176.92	223.1	44.23
1:500	500.06	13:54	16:00	215.56	284.5	43.11
1:600	600.00	13:44	17:00	238.2	361.8	39.7
1:700	700.05	13:34	17:00	<b>252.15</b>	447.9	36.0

Tabla 4



Gráfica 4. Confirmación de los resultados de absorción para la PAM de grano grueso.

Podemos ver en los resultados de las diferentes pruebas que la máxima capacidad de absorción se tuvo con la PAM en su presentación fina con 353.2ml, mientras que la presentación gruesa sólo absorbió 263.12ml como volumen máximo, aún utilizando agua destilada para su hidratación en ambos casos. Estos valores quedaron lejos de aquellos que se asegura pueden lograrse con el polímero.



#### 5.4. Prueba de evaporación de los cristales de PAM

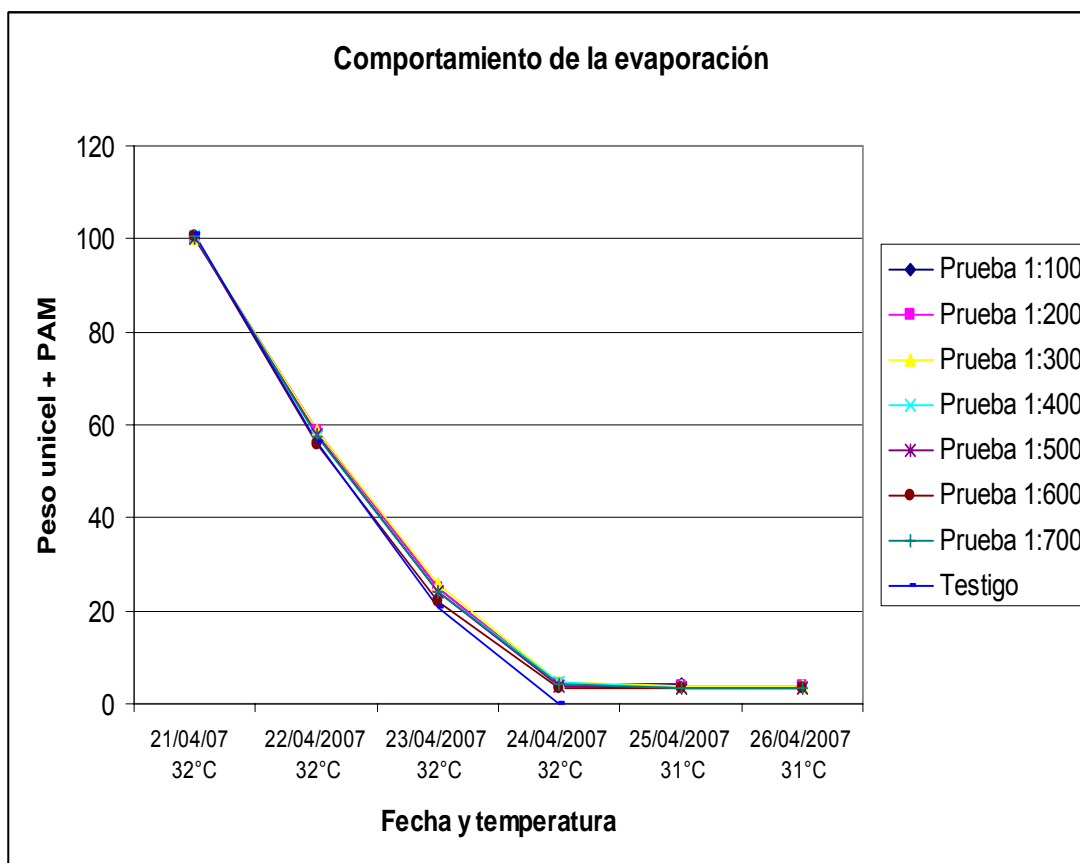
En las siguientes tablas y gráficas se muestra el comportamiento general seguido durante la evaporación de las muestras de PAM en las dos presentaciones que se analizaron:

Prueba	Peso unigel+PAM (g) 32°C 21/04/07	Peso (g) 32°C 22/04/07	Peso (g) 32°C 23/04/07	Peso (g) 32°C 24/04/07	Peso (g) 31°C 25/04/07	Peso (g) 31°C 26/04/07
1:100	100.228	58.644	25.023	4.018	4.015	
1:200	100.078	58.662	25.025	4.082	3.977	3.978
1:300	100.275	58.629	25.665	4.717	3.722	3.723
1:400	100.694	57.581	24.121	4.528	3.494	3.491
1:500	100.268	57.684	24.046	3.750	3.432	3.430
1:600	100.372	55.734	21.873	3.487	3.482	3.479
1:700	100.432	57.418	24.176	4.157	3.505	3.502
Testigo	100.881	56.005	20.896	2.990 s/agua		

**Tabla 5. Comportamiento de la evaporación en los cristales hidratados de PAM fina**

Prueba	Peso unigel+PAM (g) 32°C 21/04/07	Peso (g) 32°C 22/04/07	Peso (g) 32°C 23/04/07	Peso (g) 32°C 24/04/07	Peso (g) 31°C 25/04/07	Peso (g) 31°C 26/04/07
1:100	100.228	41.584	33.621	21.005	0.003	
1:200	100.078	41.416	33.637	20.943	0.105	-0.001
1:300	100.275	41.646	32.964	20.948	0.995	-0.001
1:400	100.694	43.113	33.460	19.593	1.034	0.003
1:500	100.268	42.584	33.638	20.296	0.318	0.002
1:600	100.372	44.638	33.861	18.386	0.005	0.003
1:700	100.432	43.014	33.242	20.019	0.652	0.003
Testigo	100.881	44.876	35.109	17.906 s/agua		

**Tabla 6. Pérdida de humedad por evaporación (en gramos) sufrida por los cristales de PAM fina**



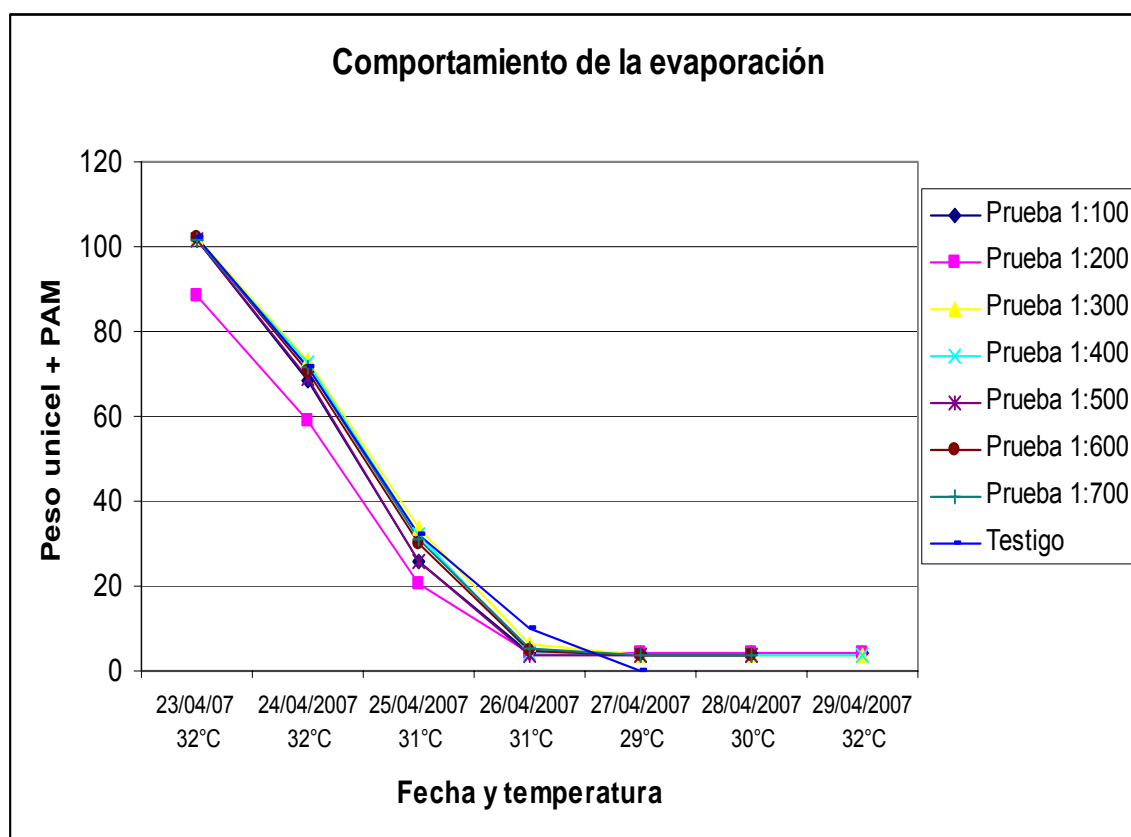
Gráfica 5. Prueba de evaporación PAM fina

Prueba	Peso unicef+PAM (g)	Peso (g)	Peso (g)	Peso (g)	Peso (g)	Peso (g)	Peso (g)
	32°C 23/04/07	32°C 24/04/07	31°C 25/04/07	31°C 26/04/07	29°C 27/04/07	30°C 28/04/07	32°C 29/04/07
1:100	101.685	68.394	25.940	4.202	4.116	4.099	4.101
1:200	88.260	58.922	20.734	4.028	4.006	3.982	3.992
1:300	102.246	72.909	33.876	6.089	3.897	3.882	3.885
1:400	101.441	72.385	31.865	4.352	3.728	3.717	3.714
1:500	101.688	68.723	25.876	3.868	3.650	3.650	
1:600	101.885	70.483	29.876	4.767	3.638	3.639	
1:700	101.841	71.428	30.871	5.372	3.631	3.634	
Testigo	102.133	71.430	32.058	9.793	3.137 s/agua		

Tabla 7. Comportamiento de la evaporación en los cristales hidratados de PAM gruesa

Prueba	Peso unigel+PAM (g) 32°C 23/04/07	Peso (g) 32°C 24/04/07	Peso (g) 31°C 25/04/07	Peso (g) 31°C 26/04/07	Peso (g) 29°C 27/04/07	Peso (g) 30°C 28/04/07	Peso (g) 32°C 29/04/07
1:100	101.685	33.291	42.454	21.738	0.086	0.017	-0.002
1:200	88.260	29.338	38.188	16.706	0.022	0.024	-0.010
1:300	102.246	29.337	93.033	27.787	2.192	0.015	-0.003
1:400	101.441	29.056	40.520	27.513	0.624	0.011	0.003
1:500	101.688	32.965	42.847	22.008	0.218	0	
1:600	101.885	31.402	40.607	25.109	1.129	-0.001	
1:700	101.841	30.413	40.557	25.499	1.741	-0.003	
Testigo	102.133	30.703	39.372	22.265	6.656 s/agua		

Tabla 8. Pérdida de humedad por evaporación (en gramos) sufrida por los cristales de PAM gruesa



Gráfica 6. Prueba de evaporación PAM gruesa

Se aprecia en las gráficas de las pruebas de evaporación que la PAM no es capaz de retener el agua absorbida por un tiempo mayor y, de hecho, el ritmo de pérdida de humedad que tiene es prácticamente el mismo que la de un volumen equivalente de agua a temperatura ambiente, sin importar el volumen de agua absorbido por los cristales de PAM.

Con esto se comprueba lo mencionado por Laosheng Wu, en el sentido de que este polímero no puede conservar el agua absorbida.



Figura 32



Figura 33

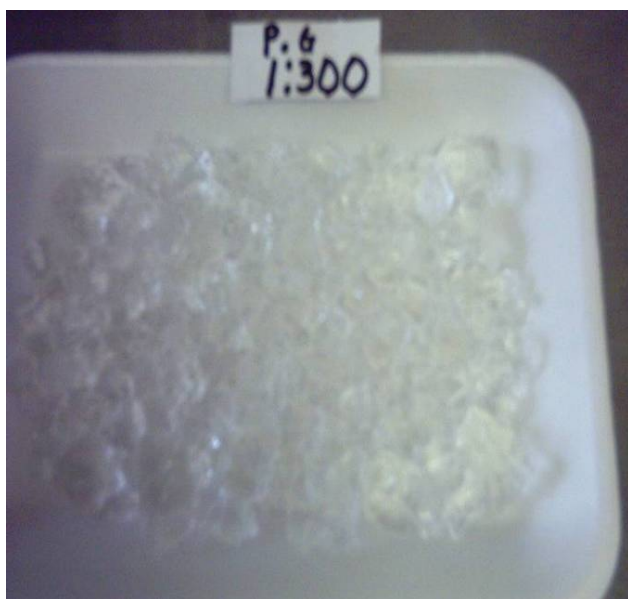


Figura 34

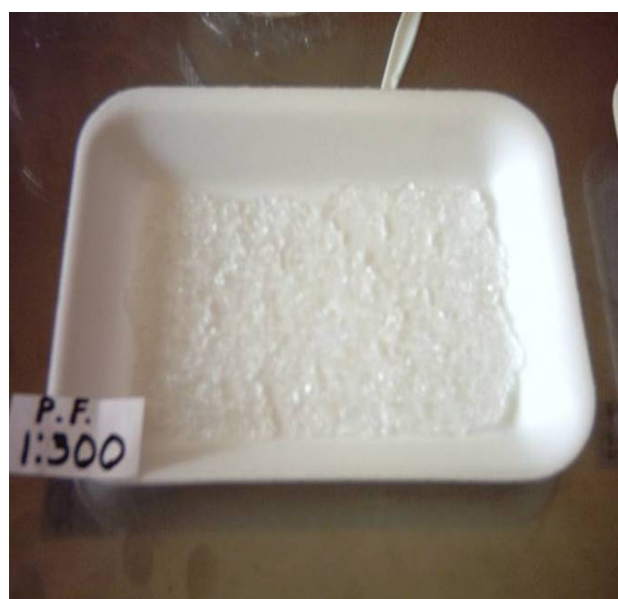


Figura 35

**Diversos aspectos de la prueba de evaporación de la PAM**

## 5.5. Capacidad de absorción de la PAM de un agua con sales

### 5.5.1 Pruebas de 1:100 y 1:200 con $K_2SO_4$ , $MgSO_4$ y $NaCl$

Para este análisis primero se tomaron 6 vasos de precipitados, a tres de ellos se les agregaron 100ml de agua destilada y 200ml a los vasos restantes. Posteriormente, a todos los vasos de agua se les añadieron diferentes cantidades de  $K_2SO_4$  y se les midió la conductividad eléctrica con un potenciómetro, tratando de que estos valores se acercaran lo más posible a los 2, 4 y 8mS (micro Siemens) de conductividad. A los valores obtenidos se les aplicó la técnica de dispersión lineal para corregir las cantidades de sal a agregar. Las conductividades y las cantidades de  $K_2SO_4$  que se obtuvieron en ambos casos para esta prueba fueron las siguientes:

Con 100ml de agua

C. E mS	$K_2SO_4$ (g)
1.70 $\mu$ S	0
2.02	0.122
4.04	0.265
8.01	0.559

Con 200ml de agua

C. E mS	$K_2SO_4$ (g)
3.39 $\mu$ S	0
2.02	0.248
4.06	0.530
8.03	1.133

Una vez preparadas las soluciones fueron agregadas en los vasos de precipitados correspondientes, cada uno de los cuales contenía un gramo de PAM.

Los diferentes valores manejados y los resultados obtenidos se muestran a continuación:

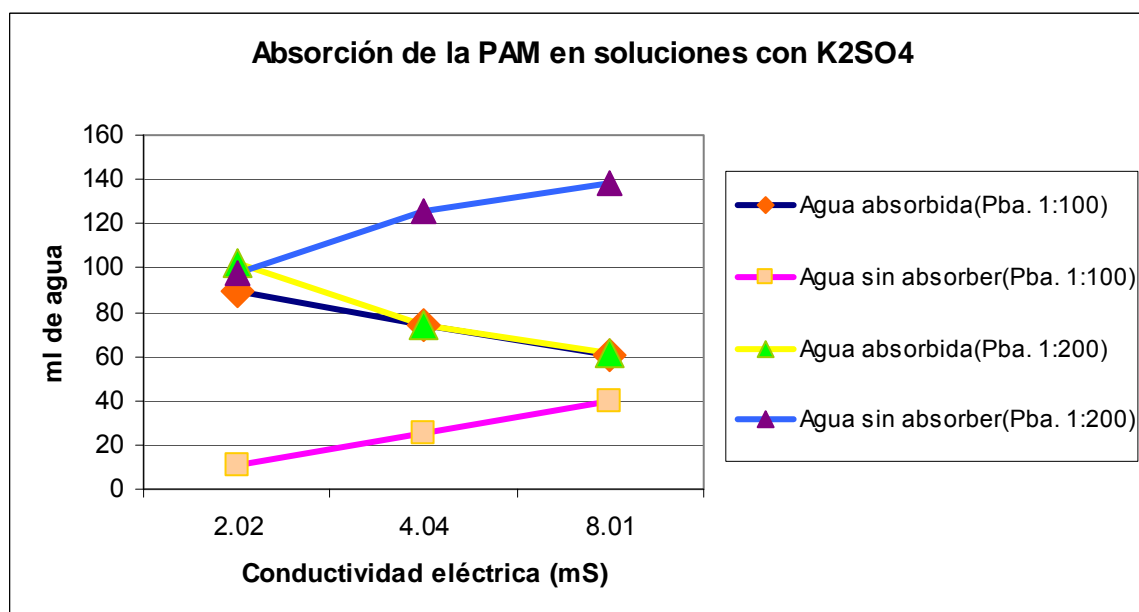
Prueba	Peso PAM (g)	Conductividad Eléctrica (mS)	Agua Añadida (ml)	Hora inicio	Hora término	Agua Absorbida (ml)	Agua sin absorber (ml)	% de agua absorbida
1:100	1.001	2.02	100	18:33	18:56	89.6	10.4	89.60
1:100	1.001	4.04	100	18:33	18:58	74.3	25.7	74.30
1:100	1.001	8.01	100	18:33	19:00	60.2	39.8	60.20
1:200	1.001	2.02	200	18:35	19:25	102.2	97.8	51.10
1:200	1.000	4.06	200	18:35	19:27	74.5	125.5	37.25
1:200	1.000	8.03	200	18:35	19:30	61.5	138.5	30.75

Tabla 9. Porcentaje de absorción de la PAM de un agua con  $K_2SO_4$ .

Al comparar los porcentajes de absorción de la tabla anterior contra los porcentajes máximos de absorción que se tuvieron en las mismas pruebas realizadas con el polímero solo, se tiene:

Prueba	Máxima absorción (%) PAM sola	Máximos de absorción (%) de PAM con $K_2SO_4$	Disminución de la absorción (%)
1:100	100	89.60	10.40
1:100	100	74.30	25.70
1:100	100	60.20	39.80
1:200	94.18	51.10	45.74
1:200	94.18	37.25	60.45
1:200	94.18	30.75	67.35

Tabla 10. Comparativo de absorción de la PAM de un agua sola y de un agua con  $K_2SO_4$ .



Gráfica 7. Absorción de la PAM en soluciones con  $K_2SO_4$ .



Figura 36. Aspecto de los cristales de PAM hidratados usando soluciones con diferentes cantidades de sal

En el caso del  $MgSO_4$  las conductividades que se obtuvieron fueron:

Con 100ml de agua

C. E. mS	$MgSO_4$ (g)
1.84 $\mu$ S	0
2.07	0.310
4.02	0.710
8	1.7

Con 200ml de agua

C. E. mS	$MgSO_4$ (g)
2.08 $\mu$ S	0
2.05	0.620
4.04	1.421
8.06	3.401

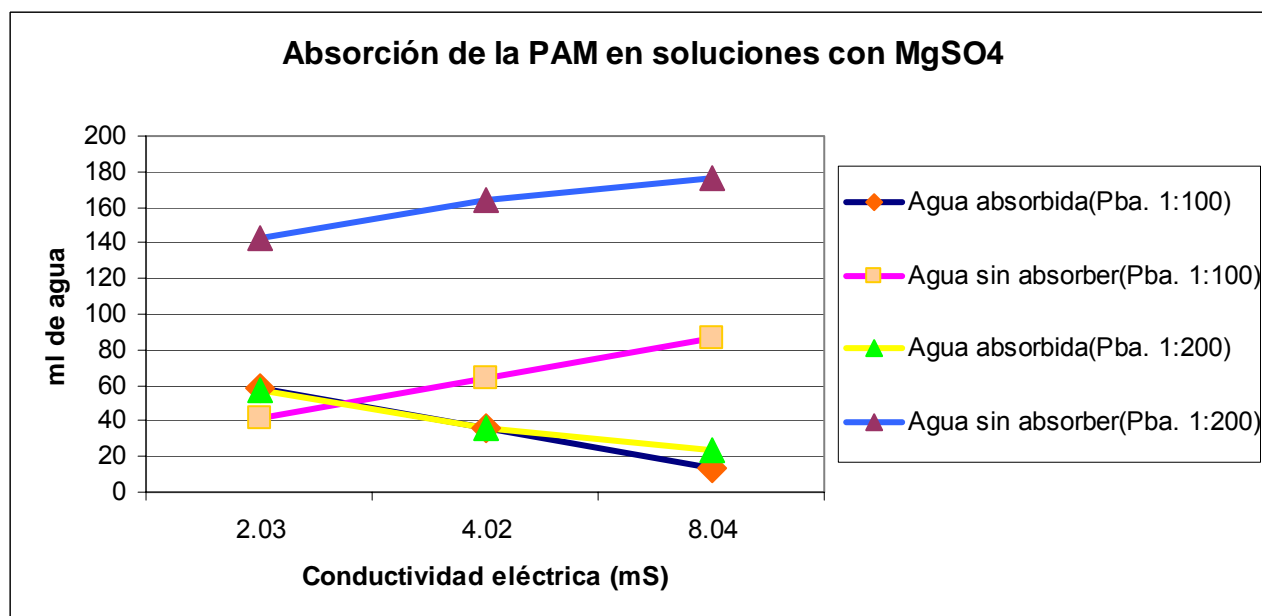
De la misma forma, los resultados obtenidos con estas pruebas se muestran en la siguiente tabla:

Prueba	Peso PAM (g)	Conductividad Eléctrica (mS)	Agua Añadida (ml)	Hora inicio	Hora Término	Agua Absorbida (ml)	Agua sin absorber (ml)	% de agua absorbida
1:100	1.000	2.03	100	13:30	13:51	58.1	41.9	58.10
1:100	1.001	4.02	100	13:30	13:51	36.0	64.0	36.00
1:100	1.002	8.04	100	13:30	13:52	13.4	86.6	13.40
1:200	1.001	2.04	200	17:04	17:47	57.6	142.4	28.80
1:200	1.001	4.00	200	17:04	17:50	36.2	163.8	18.10
1:200	1.001	7.99	200	17:04	17:52	24.0	176.0	12.00

Tabla 11. Porcentaje de absorción de la PAM de un agua con  $MgSO_4$ .

Prueba	Máxima absorción (%) PAM sola	Máximos de absorción (%) de PAM con MgSO <sub>4</sub>	Disminución de la absorción (%)
1:100	100	58.10	41.90
1:100	100	36.00	64.00
1:100	100	13.40	86.60
1:200	94.18	57.60	38.83
1:200	94.18	36.20	61.56
1:200	94.18	24.00	74.52

Tabla 12. Comparativo de absorción de la PAM de un agua sola y de un agua con MgSO<sub>4</sub>.



Gráfica 8. Absorción de la PAM en soluciones con MgSO<sub>4</sub>.



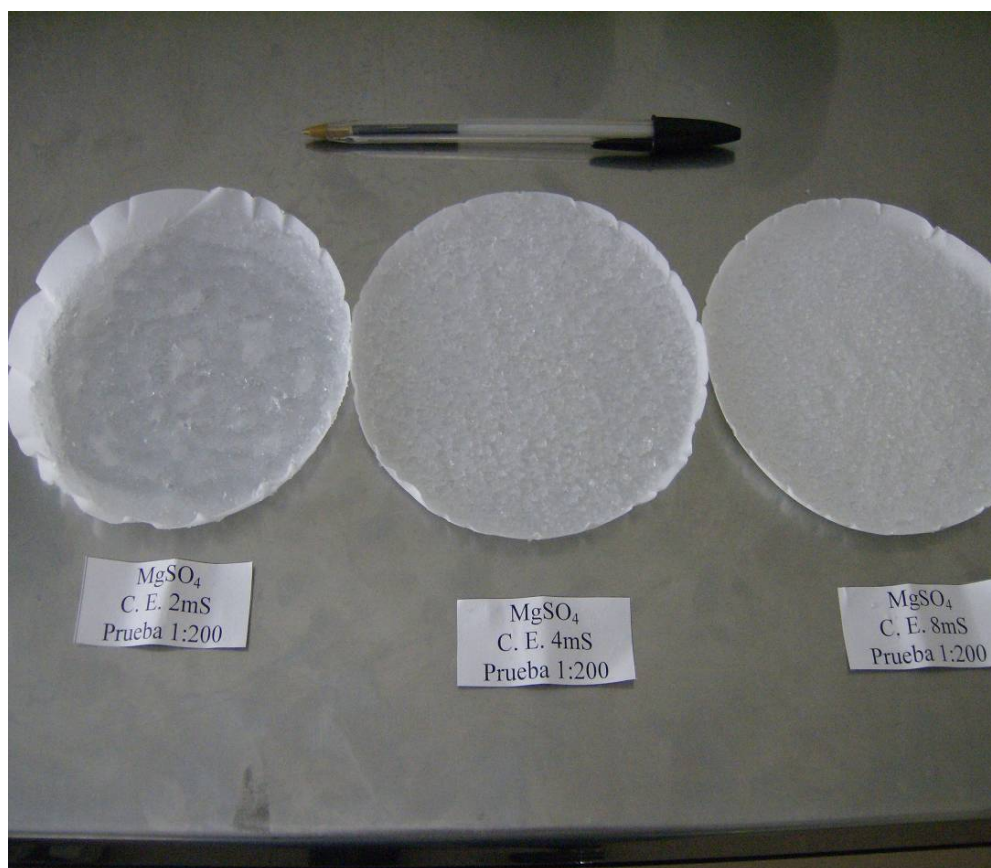


Figura 37. Aspecto de los cristales de PAM hidratados usando soluciones con diferentes cantidades de sal

Las conductividades conseguidas en el análisis del NaCl fueron:

Con 100ml de agua

C. E. mS	NaCl (g)
2.69 $\mu$ S	0
1.99	0.091
4.01	0.190
8.03	0.392

Con 200ml de agua

C. E. mS	NaCl (g)
3.01 $\mu$ S	0
0.186	2.01
0.381	4.01
0.786	8.03

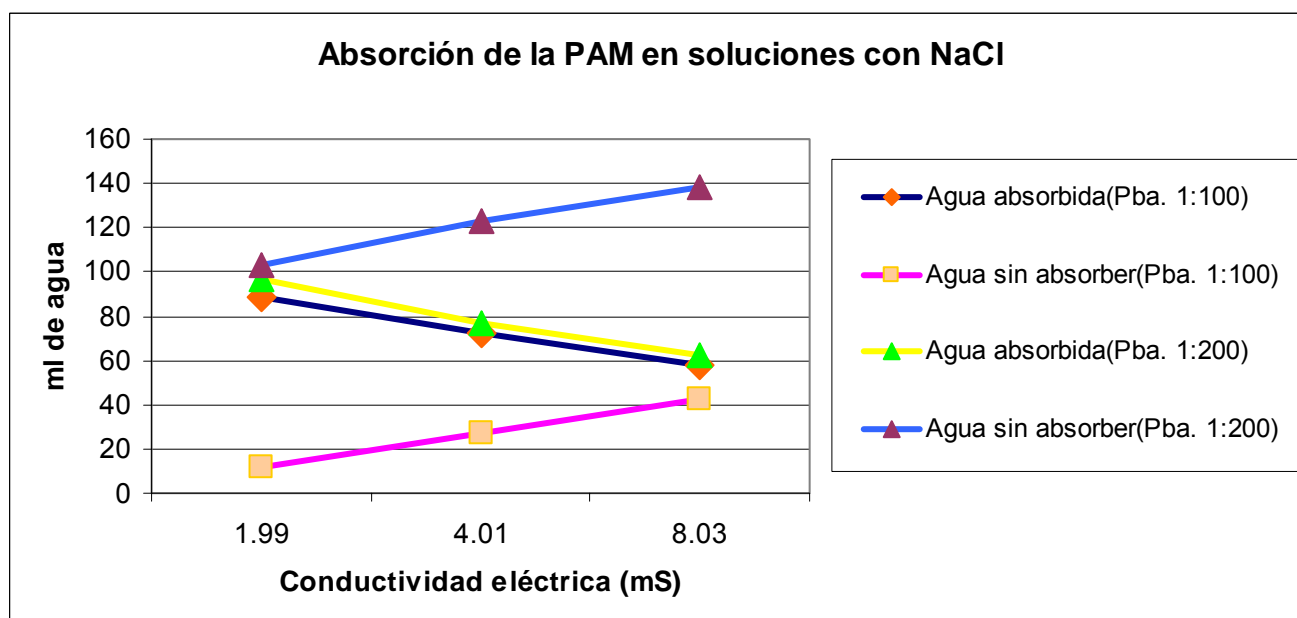
De igual forma, los valores de absorción obtenidos fueron:

Prueba	Peso PAM (g)	Conductividad Eléctrica (mS)	Agua Añadida (ml)	Hora Inicio	Hora término	Agua Absorbida (ml)	Agua sin Absorber (ml)	% de agua absorbida
1:100	1.001	1.99	100	13:49	14:09	88.2	11.8	88.20
1:100	1.001	4.01	100	13:49	14:11	72.6	27.4	72.60
1:100	1.000	8.03	100	13:49	14:14	57.7	42.3	57.70
1:200	1.001	2.01	200	16:54	17:34	97.0	103.0	48.50
1:200	1.000	4.01	200	16:54	17:36	76.8	123.2	38.40
1:200	1.001	8.03	200	16:54	17:39	62.0	138.0	31.00

Tabla 13. Porcentaje de absorción de la PAM de un agua con NaCl.

Prueba	Máxima absorción (%) PAM sola	Máximos de absorción (%) de PAM con MgSO <sub>4</sub>	Disminución de la absorción (%)
1:100	100	88.20	11.80
1:100	100	72.60	27.40
1:100	100	57.70	42.30
1:200	94.18	48.50	48.50
1:200	94.18	38.40	59.23
1:200	94.18	31.00	67.08

Tabla 14. Comparativo de absorción de la PAM de un agua sola y de un agua con NaCl.



Gráfica 9. Absorción de la PAM en soluciones con NaCl.

En el caso de la absorción de un agua que contiene una sal disuelta se observa en todas las gráficas un descenso casi lineal, muy similar para cada grupo de pruebas, en la capacidad de absorción del polímero conforme se incrementa la cantidad de sal disuelta en el agua, así como una disminución del tamaño de los cristales de PAM proporcional a la cantidad de sal disuelta.

Esto último puede representar una limitante más para el empleo de éste polímero a nivel de campo, ya que muchos de los suelos y el agua utilizados en las zonas de riego presentan, en mayor o menor grado, problemas de salinización debidos principalmente a malas técnicas en el aprovechamiento del suelo y del agua, lo que puede disuadir a los productores agrícolas de utilizarlo en sus tierras de labor.

## 5.6. Prueba de absorción de la PAM mezclada con arena

Como se puede ver en las figuras 39 y 40, sobre todo en ésta última, a medida que los cristales de PAM se hidrataban comenzaron a incrementar su tamaño y a afectar el arena que los rodeaba. En la Fig. 38 no se puede apreciar el fenómeno porque en éste caso los cristales aún no se hidrataban.

Cuando finalmente se terminó de hidratar el polímero, en todas las pruebas se observó que en el caso de la PAM abajo, el aumento de los cristales hizo que la altura de la arena subiera alrededor de 4-5mm sobre la marca inicial de los 15cm en los 3 botes, los cuales comenzaron a drenar cuando se habían añadido de 1,250-1,300ml de agua. Por otro lado, al final de la prueba, los cristales de PAM hidratados se veían como una delgada franja de color más oscura que el resto de la arena circundante (Fig. 41).



Figura 38



Figura 39

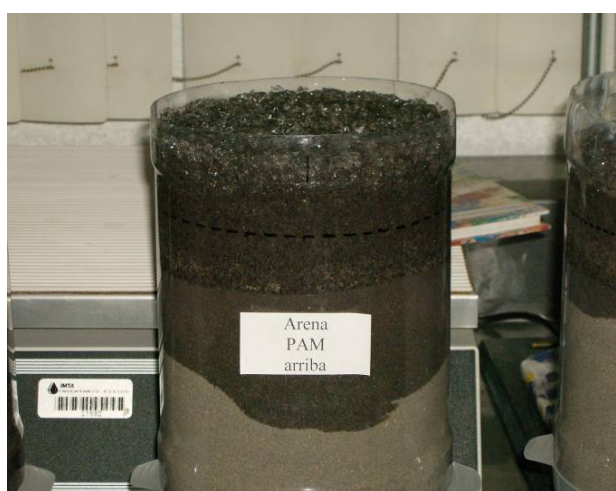


Figura 40



Figura 41

**Aspectos de la adición de agua a las pruebas a) PAM abajo; b) PAM mezclada; c) PAM arriba y d)PAM y arena totalmente hidratadas (PAM abajo)**

En el caso de la prueba con la PAM arriba, los cristales hidratados empujaron el arena tanto hacia arriba como hacia abajo, 5 y 3cm respectivamente, de la línea inicial de los 15cm. El incremento del volumen de los cristales hacia arriba hizo que la delgada capa de arena que los cubría prácticamente desapareciera y sobresalieran notoriamente del borde de los botes. Los botes comenzaron a drenar cuando se habían añadido entre 2,100 y 2,400ml de agua (Fig. 42).



Figura 42. Aspecto de la prueba con la PAM arriba y arena totalmente hidratadas

En la prueba con la PAM y la arena mezcladas, los cristales de polímero hidratados hicieron que la arena incrementara de 1-1.5cm su altura sobre la marca inicial de los 15cm. Los botes comenzaron a drenar cuando se habían agregado de 1,450-1,550ml de agua y los cristales de PAM hidratados se apreciaban como puntos o manchas de color más oscuro distribuidos por toda la arena, además de que era notable el mayor tamaño de los cristales ubicados en la parte superior de los botes (Fig. 43).



Figura 43. Aspecto de la prueba con la PAM y el arena mezcladas y completamente hidratadas.

### 5.7. Determinación del agua absorbida y prueba de retención de la PAM con la arena

Durante el tiempo que los botes estuvieron drenando se tomaron pesadas diarias de los recipientes colocados debajo de ellos (hieleras) hasta que la diferencia entre pesadas fue de 0.1-0.3g y/o los valores tendían a la baja (Fig. 44). Una vez que esto sucedió, se determinó la cantidad de agua drenada (agua sin absorber) en cada caso, haciendo la diferencia entre el máximo peso alcanzado por la hielera con el agua y su peso vacía. Hecho lo anterior, se restó la cifra obtenida al volumen total de agua añadida a cada uno de los botes con lo que se obtuvo la cantidad de agua absorbida en cada caso.

Igualmente se tomaron pesadas diarias de los botes con arena sola para medir la pérdida de humedad sufrida bajo condiciones ambientales en el interior del Laboratorio de Suelos del IMTA. También se tomó la temperatura diaria en el laboratorio para relacionar la pérdida de agua por evaporación en los botes con respecto a la temperatura ambiente.



Figura 44. Ejemplo de la prueba de drenado. Prueba PAM arriba

Durante el tiempo que duró esta prueba, se observaron una serie de características comunes a todas las pruebas, si bien ocurrieron en diferentes tiempos y de forma más notoria en unos casos que en otros. Así, en el lapso que los botes estuvieron drenando se tuvieron grandes variaciones de peso tanto en los recipientes que recolectaban el agua en la parte inferior como en los botes mismos.

Una vez que los botes terminaron de drenar el agua, las pérdidas de peso comenzaron a tener diferencias cada vez menores, tendiendo a la uniformidad en todos los casos. Además, a medida que la PAM y la arena perdían humedad comenzaron a reducir su volumen, a separarse de las paredes botes y los cristales de polímero disminuyeron su tamaño.

Con base en los datos obtenidos hasta esta etapa del estudio, se puede decir que tomando como inicio los volúmenes máximos de agua absorbidos por la PAM (353.2ml/g) y el arena (1100ml) obtenidos de las pruebas anteriores, y dado que se emplearon en todas las pruebas 8g de polímero, se calculó que el conjunto de arena y PAM debería ser capaz de absorber un volumen máximo de:  $(8)(353.2) + 1100 = 3,830\text{ml}$ , aproximadamente.

Ahora bien, una vez terminadas las pruebas los volúmenes máximos que se alcanzaron fueron:

$T_3 = 1,294\text{ml}$     PAM arriba = 1,940ml    PAM mezclada = 1,504ml    PAM abajo = 1,243ml

Con esto se observa que en ninguno de los casos se pudo alcanzar el volumen de absorción máximo calculado, lo que ya representa una limitante para el empleo de la PAM. Algunas de las razones por las que se dieron estos resultados se pueden deber a:

- La competencia por las moléculas de agua entre las partículas de arena y los cristales de PAM que en última instancia no permite que la PAM tenga un mejor desempeño.
- Las partículas de arena más finas pueden ocupar espacios en los cristales de PAM afectando su capacidad de absorción y expansión.
- La presión ejercida por el peso de la arena que impide que los cristales hidratados de PAM se expandan e incrementen la absorción de agua. Este punto es especialmente importante para las pruebas con la PAM abajo y la PAM mezclada.

En el primero de los casos, suponemos que al iniciar la adición de agua, los cristales de PAM están en la mejor posibilidad de competir con los granos de arena por las moléculas de agua debido a que se encuentran completamente secos. A medida que los cristales del polímero y los granos de arena absorben y retienen el agua, estas capacidades van disminuyendo y al ser los granos de arena mucho más numerosos que los cristales de PAM, están en condiciones de atraer un mayor número de moléculas de agua.

En el segundo de los casos, entre el arena más gruesa hay granos de arena mucho más finos que, a medida que los cristales de PAM absorben agua e incrementan su tamaño, pueden adherirse a su superficie mediante la atracción de las cargas eléctricas y formar una especie de costra sobre ellos, lo que disminuye su capacidad de absorción.

En el último caso conforme los granos de arena se humedecen, aumentan de peso y sufren un proceso de compactación, lo que hace que los cristales de PAM que se encuentran entre ellos no puedan expandirse adecuadamente limitando la cantidad que pueden absorber de agua. Esto es de particular importancia para las pruebas con la PAM abajo y mezclada con la arena.

También se puede apreciar que no obstante lo anterior, el polímero permitió que el arena almacenara un volumen de agua adicional, el cual varió dependiendo del tipo de prueba. Así, tenemos que en la prueba con la PAM arriba ésta almacenó un volumen de agua adicional del 76% (840ml); en la prueba de la PAM y la arena mezcladas, el volumen de agua adicional fue de alrededor del 37% (404ml) y para la prueba con la PAM abajo éste volumen fue de 13% (143ml).

Sin embargo, los volúmenes absorbidos por el conjunto de arena y PAM, en todos los casos, quedaron lejos del volumen teórico calculado, de 3,800ml, en un porcentaje del 49.4%, del 60.7% y del 67.5% para las pruebas de PAM arriba, PAM mezclada y PAM abajo, respectivamente.

En el caso de las pruebas de retención y evaporación de agua, los datos hasta este momento no indican que la mezcla de arena y PAM sea capaz de marcar una diferencia notable en estos aspectos. Las cifras muestran, en el caso de la retención, que la pérdida de humedad en todas las

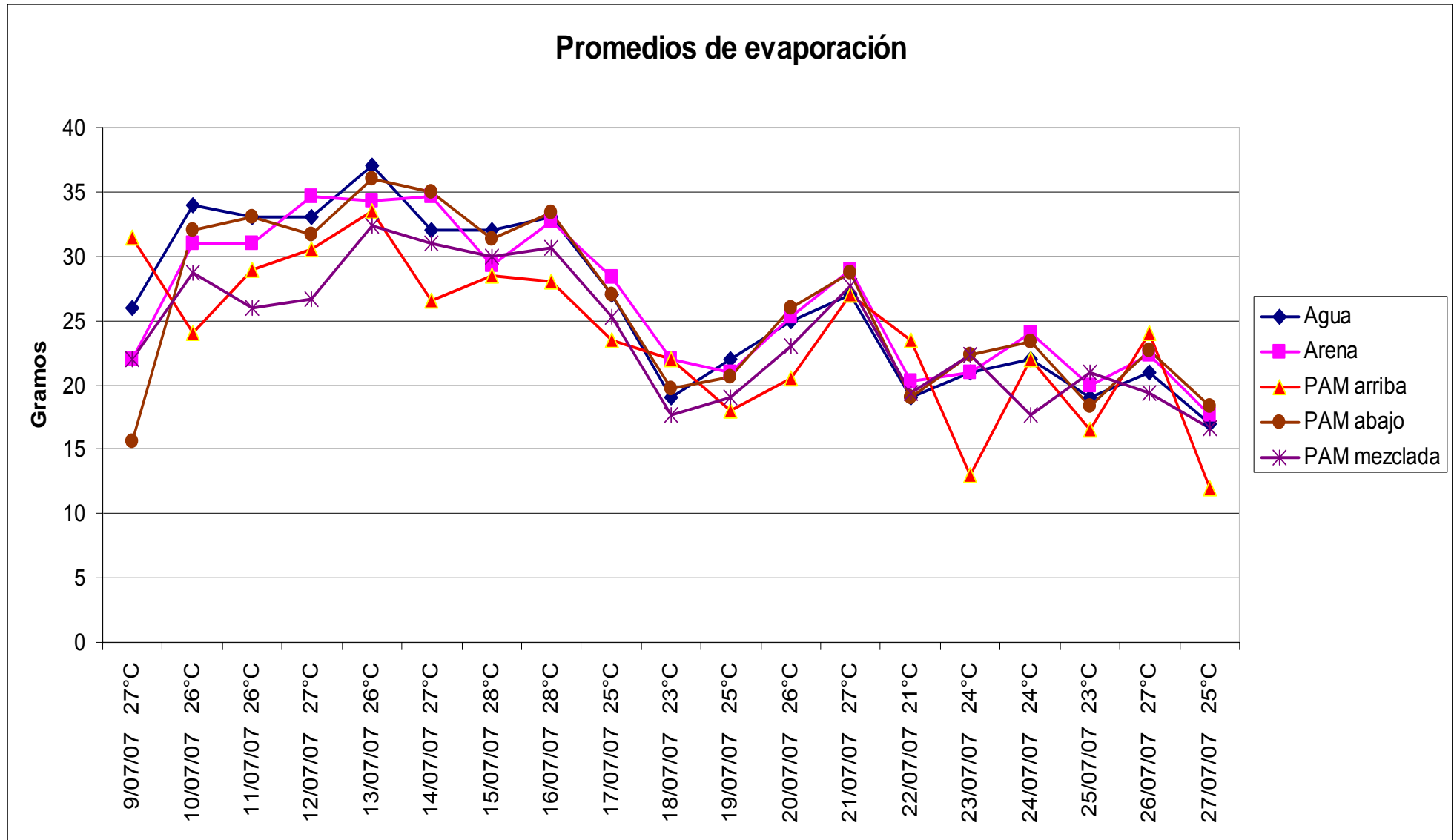
pruebas sigue el mismo comportamiento que el bote con agua, por lo que el uso de la PAM no es factor para aumentar la retención de agua en el suelo. **(Ver gráficas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10 y 11)**

De hecho, al inicio de todas las pruebas las pérdidas de humedad registradas en ellas superaron a las del bote con agua debido a que estaban drenando el exceso de agua contenido, pero una vez que se estabilizaron al cabo de unos días su comportamiento ha sido prácticamente el mismo en todos los casos salvo algunas pequeñas diferencias.

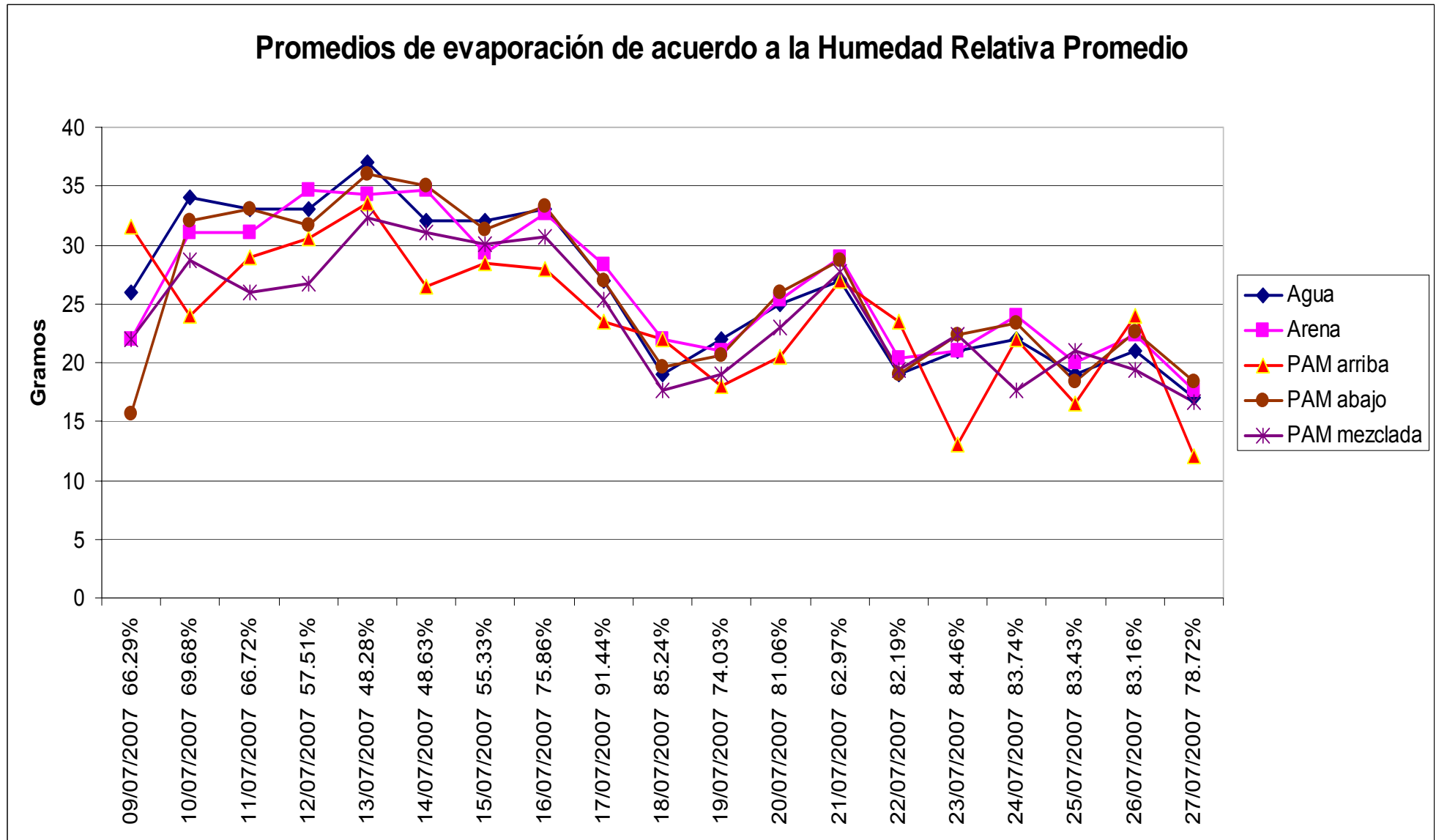
Lo anterior nos lleva a pensar que de aplicarse el riego en las mismas condiciones de las pruebas anteriores, en un primer momento al estar tanto la tierra como la PAM a su máxima capacidad de absorción, (en el caso de la PAM lo más probable es que la cantidad de agua absorbida sea incluso menor a la obtenida en el laboratorio con las pruebas realizadas) la cantidad de agua perdida por el suelo y la PAM tendrá grandes variaciones durante algunos días, al cabo de los cuales estas pérdidas tenderán a estabilizarse para posteriormente seguir patrones muy similares.

Por otro lado, las partículas de suelo más pequeñas y finas tienden a adherirse sobre la superficie de los cristales de PAM hidratados formando un delgado recubrimiento en ellos, mismo que se advierte de forma más clara conforme estos cristales pierden humedad y este recubrimiento comienza a endurecerse. Esto hace que con el tiempo dicha cubierta se haga más sólida e incremente su grosor, lo que provoca que los cristales de PAM pierdan sus capacidades de absorción y retención, acortando su vida útil y mermando su eficiencia de trabajo.





Gráfica 13. Promedios de evaporación de la diferentes pruebas.



Gráfica 14. Promedios de evaporación de las diferentes pruebas de acuerdo a la Humedad Relativa Promedio.

En las gráficas 13 y 14 se puede apreciar el fenómeno antes mencionado, sin embargo es notable que ciertos días la evaporación alcanzó picos tanto hacia arriba como hacia abajo de la línea de tendencia central afectando a la mayoría de las pruebas (días 13, 18, 21 y 23 de Julio). Esto puede explicarse en parte por las condiciones climatológicas que prevalecieron los días próximos a ellos y el día de la lectura, ya que algunos de esos días fueron los más calurosos del mes y porque los primeros días (4 en el caso de las pruebas con la PAM abajo y mezclada; 1 para el arena sola y 12 para la prueba con la PAM arriba) a las pérdidas causadas por la evaporación se sumaban las pérdidas que los botes sufrían debido al drenado del agua sin absorber en cada uno de ellos.

Por otro lado, las características propias de cada prueba facilitaron en mayor o menor grado la evaporación del agua retenida. Dado que el arena es un tipo de suelo que absorbe y pierde con facilidad el agua que recibe, en la prueba con la PAM arriba se dio la circunstancia de que la PAM pudo absorber una buena cantidad de agua, actuando como una esponja, pero esto hizo que el polímero hidratado terminara por sobresalir de la parte superior del bote quedando más expuesta a las condiciones ambientales y, como mostraron las pruebas de evaporación anteriores, la PAM sola no es capaz de conservar un mayor tiempo la humedad bajo esas condiciones.

Además, esta situación puede provocar dificultades a la hora de realizar algunas actividades al emplearse sobre grandes extensiones de tierra.

En el caso de la prueba con la PAM mezclada, si bien el arena no permitió que la PAM absorbiera una mayor cantidad de agua, sí ayudó a que los cristales del polímero retuvieran un tiempo mayor la humedad, sobre todo en las partes inferiores, lo que hizo que el nivel de evaporación de la prueba se mantuviera la mayor parte de las veces igual o menor a la del bote con agua.

En la prueba con la PAM abajo, la acción mecánica del arena no permitió que la PAM absorbiera una mayor cantidad de agua, sin embargo, le permitió una mejor retención de la misma y debido a esto, casi toda la pérdida de humedad se tuvo en el agua contenida en el arena, por lo que su comportamiento terminó siendo muy similar a la prueba del arena.

## 5.8. Análisis estadístico

Se realizó un análisis estadístico de los diferentes datos obtenidos en las diversas pruebas con el objeto de establecer, de forma matemática y no sólo física, que tan alejadas se encontraban sus medias entre sí y confirmar o no las conclusiones obtenidas mediante observación. Para ello, se seleccionó el método de *t-student* debido a la sencillez de sus cálculos, la exactitud en sus resultados y porque permite trabajar con grupos de datos pequeños, lo cual resultó muy importante en este caso.

En el caso de las pruebas de absorción realizadas con la PAM fina y gruesa al inicio del trabajo, al contar ambos tipos de polímero con dos análisis, se construyó una nueva tabla con los promedios de los valores obtenidos. Las cifras conseguidas para la PAM fina basadas en las tablas 1 y 2 fueron:

Prueba	Media Agua absorbida	Media Agua libre	Media % de agua absorbida
1:100	100.05	0	100
1:200	187.075	12.95	93.59
1:300	229.195	70.85	76.405
1:400	264.095	135.95	66.025
1:500	299.285	200.75	59.855
1:600	324.25	275.8	54.04
1:700	352.405	347.6	50.345
<b>Media total</b>	<b>250.908</b>	<b>149.129</b>	<b>71.466</b>

Tabla 15. Valores promedio de la PAM fina

y para la PAM gruesa los valores obtenidos de las tablas 3 y 4 fueron:

Prueba	Media Agua absorbida	Media Agua libre	Media % de agua absorbida
1:100	100.02	0	100
1:200	152.25	47.75	76.15
1:300	186.28	109.75	56.79
1:400	189.005	211.05	47.245
1:500	226.445	273.6	45.29
1:600	244.665	355.35	40.78
1:700	257.635	442.4	36.8
<b>Media total</b>	<b>193.757</b>	<b>205.700</b>	<b>57.579</b>

**Tabla 16. Valores promedio de la PAM gruesa**

Como aclaración, cabe decir que en el caso de los análisis sobre la absorción que se realizaron con los dos tipos de PAM, se determinó hacer sólo dos repeticiones debido a la similitud de los resultados obtenidos en cada caso, atribuidos a la homogeneidad de tamaño y composición de sus cristales.

De la misma forma, por la marcada diferencia que hay entre los volúmenes de agua absorbidos, con excepción de la prueba 1:100, en ambos tipos de polímero, al contrastarlos con su similar opuesto en la mayoría de las pruebas hechas, no se creyó necesario realizar un análisis estadístico más profundo.

Un análisis más a fondo se aplicó a los resultados obtenidos en las diferentes pruebas de absorción hechas en las macetas. De la misma forma, los datos seleccionados para realizar este análisis fueron los correspondientes al agua absorbida en cada caso. Las cifras usadas en los cálculos fueron:

Arena sola:

Prueba	Agua agregada (ml)	Peso hielera (g)	Peso hielera + agua drenada(g)	Agua absorbida (ml)	Agua sin absorber (ml)	% de agua absorbida
1	1,213	59	149	1,123.0	90	92.580
2	1,175	59.5	178.6	1,055.9	119.1	89.864
3	1,391	59.9	157.7	1,293.2	97.8	92.969

**Tabla 17. Volúmenes de agua absorbida y sin absorber del arena sola.**

Media de agua absorbida ( $\bar{x}_1$ )= 1157.367

Varianza ( $S^2_1$ ) = 14963.620

Cálculo de la varianza:  $\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$

Donde:  $x_i$  = Es el valor del agua absorbida en la prueba  $i$

$\bar{x}$  = Es la media del agua absorbida

$n$  = Número de muestras

Arena + PAM arriba:

Prueba	Agua agregada (ml)	Peso hielera (g)	Peso hielera + agua drenada (g)	Agua absorbida (ml)	Agua sin absorber (ml)	% de agua absorbida
1	2,394	59.4	569.4	1,884	510	78.70
2	2,450	59.6	603.9	1,906	544.3	77.78
3	Fallida					

**Tabla 18. Volúmenes de agua absorbida y sin absorber del arena con PAM arriba.**

$$\bar{x}_2 = 1894.85$$

$$S^2_2 = 235.445$$

Arena + PAM mezclada:

Prueba	Agua agregada (ml)	Peso hielera (g)	Peso hielera + agua drenada (g)	Agua absorbida (ml)	Agua sin absorber (ml)	% de agua absorbida
1	1,412.6	59.5	106.2	1,366	46.7	96.69
2	1,587.0	58.7	82.9	1,563	24.2	98.48
3	1,436.7	59.6	106.1	1,390	46.5	96.76

**Tabla 19. Volúmenes de agua absorbida y sin absorber del arena mezclada con PAM.**

$$\bar{x}_3 = 1439.633$$

$$S^2_3 = 11525.14$$

Arena + PAM abajo:

Prueba	Agua agregada (ml)	Peso hielera (g)	Peso hielera + agua drenada (g)	Agua absorbida (ml)	Agua sin absorber (ml)	% de agua absorbida
1	1,316.5	59.4	134.7	1,241	75.3	94.28
2	1,261.0	59.3	77.6	1,243	18.3	98.55
3	1,245.6	59.4	78.3	1,227	18.9	98.48

**Tabla 20. Volúmenes de agua absorbida y sin absorber del arena con PAM abajo.**

$$\bar{x}_4 = 1236.867$$

$$S^2_4 = 78.08$$

Como ya se mencionó antes, en los subsecuentes análisis sólo se emplearon los valores obtenidos de la columna del agua absorbida, ya que éste es el principal parámetro de estudio. Los datos que se consideraron para realizar los cálculos fueron los siguientes: en todos los análisis se utilizaron niveles de significancia de 95 y 80%; todas las pruebas fueron comparadas entre sí con estos valores. Los cálculos se realizaron de la forma siguiente:

### 5.8.1. Arena sola vs arena con PAM arriba

Probar si las macetas con arena y PAM arriba absorben más agua que las macetas con arena sola, suponiendo:

$$\mu_2 = \mu_1 \text{ (Hipótesis nula)}$$

$$\mu_2 \neq \mu_1 \text{ (Hipótesis alterna)}$$

Donde:  $\mu_2 = \mu_1$  (Las macetas con arena y PAM arriba no absorben más que las macetas con arena)

$\mu_2 \neq \mu_1$  (Las macetas con arena y PAM arriba absorben más que las macetas con arena)

Criterio: Se rechaza la hipótesis nula si  $t < -3.182$  ó  $t > 3.182$ , donde 3.182 es el valor de  $t_{0.025}$  para 3+2-2 = 3 grados de libertad.

$$\bar{x}_1 = 1157.367$$

$$\bar{x}_2 = 1894.85$$

$$\alpha = 95\%$$

$$S^2_1 = 14963.62$$

$$S^2_2 = 235.445$$

Utilizando la siguiente fórmula, calculamos que tan separadas se encuentran las medias de las muestras analizadas:

$$t = \left( \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}} \right) \left( \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}} \right)$$

Donde:  $\bar{x}_1$  = Media aritmética de la muestra 1

$\bar{x}_2$  = Media aritmética de la muestra 2

$s_1^2$  = Varianza de la muestra 1

$s_2^2$  = Varianza de la muestra 2

$n_1$  = Tamaño de la muestra 1

$n_2$  = Tamaño de la muestra 2

$$t = \left( \frac{1894.85 - 1157.367}{\sqrt{(14963.62)(2) + (235.445)}} \right) \left( \sqrt{\frac{(3)(2)(3)}{5}} \right) = 8.056$$

Conclusión: Como  $t = 8.056$  es mayor de 3.182, la hipótesis nula se rechaza y decimos que las macetas con arena y PAM arriba absorben más que las macetas con arena sola.

Repetimos los cálculos bajo la misma suposición pero con una  $\alpha = 80\%$

Criterio: Se rechaza la hipótesis nula si  $t < -1.638$  ó  $t > 1.638$ , donde 1.638 es el valor de  $t_{0.1}$  para 3+2-2 = 3 grados de libertad.

Conclusión: Como  $t = 8.056$  es mayor de 1.638, la hipótesis nula se rechaza y decimos que las macetas con arena y PAM arriba absorben más que las macetas con arena sola

## 5.8.2. Arena sola vs arena mezclada con PAM

El objeto de éste análisis fue probar si las macetas con arena y PAM mezcladas absorben más agua que las macetas con arena sola, suponiendo:

$$\mu_3 = \mu_1 \text{ (Hipótesis nula)} \quad \mu_3 \neq \mu_1 \text{ (Hipótesis alterna)}$$

Donde:  $\mu_3 = \mu_1$  (El arena mezclada con PAM no absorbe más que la arena sola)  
 $\mu_3 \neq \mu_1$  (El arena mezclada con PAM absorbe más que el arena sola)

Criterio: Se rechaza la hipótesis nula si  $t < -2.776$  ó  $t > 2.776$ , donde 2.776 es el valor de  $t_{0.025}$  para 3+3-2 = 4 grados de libertad.

$$\begin{array}{lll} \bar{x}_1 = 1157.367 & \bar{x}_3 = 1439.633 & \alpha = 95\% \\ S^2_1 = 14963.62 & S^2_3 = 11525.14 & \end{array}$$

$$t = \left( \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}} \right) \left( \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}} \right) = \left( \frac{1439.633 - 1157.367}{\sqrt{(14963.62)(2) + (11525.14)(2)}} \right) \left( \sqrt{\frac{(3)(3)(4)}{6}} \right)$$

$$t = 3.004$$

Conclusión: Siendo  $t = 3.004$  mayor de 2.776, la hipótesis nula se rechaza y decimos que el arena mezclada con PAM absorbe más agua que el arena sola.

Ahora, como los criterios seguidos y los cálculos son los mismos, de aquí en adelante sólo se indicaran los resultados.

Con  $\alpha = 80\%$

Conclusión:  $t = 3.004$  es mayor de 1.533, por lo que la hipótesis nula se rechaza y decimos que el arena con PAM mezclada absorbe más que el arena sola.

### 5.8.3. Arena sola vs arena con PAM abajo

Probar si las macetas con arena y PAM abajo absorben más agua que las macetas con arena sola, suponiendo:

$$\mu_4 = \mu_1 \text{ (Hipótesis nula)} \quad \mu_4 \neq \mu_1 \text{ (Hipótesis alterna)}$$

Donde:  $\mu_4 = \mu_1$  (El arena con PAM abajo no absorbe más que el arena sola)



$\mu_4 \neq \mu_1$  (El arena con PAM abajo absorbe más que el arena sola)

Criterio: Se rechaza la hipótesis nula si  $t < -1.123$  ó  $t > 1.123$ , donde 1.123 es el valor de  $t_{0.025}$  para  $3+3-2 = 4$  grados de libertad.

$$\begin{array}{lll} \bar{x}_1 = 1157.367 & \bar{x}_4 = 1236.867 & \alpha = 95\% \\ S^2_1 = 14963.62 & S^2_4 = 78.08 & \end{array}$$

$$t = \left( \frac{1236.62 - 1157.367}{\sqrt{(14963.62)(2) + (78.08)(2)}} \right) \left( \sqrt{\frac{(3)(3)(4)}{6}} \right) = 1.123$$

Conclusión: Como  $t = 1.123$  es menor de 2.776, se acepta la hipótesis nula y decimos que el arena con PAM abajo no absorbe más agua que el arena sola.

Con  $\alpha = 80\%$

Conclusión:  $t = 1.123$  es menor de 1.533, por lo que la hipótesis nula se acepta y decimos que el arena con PAM abajo no absorbe más que el arena sola.

#### 5.8.4. Arena con PAM arriba vs arena mezclada con PAM

Probar si las macetas con arena y PAM arriba absorben más agua que las macetas con arena mezclada con PAM, suponiendo:

$$\mu_2 = \mu_3 \text{ (Hipótesis nula)} \quad \mu_2 \neq \mu_3 \text{ (Hipótesis alterna)}$$

Donde:  $\mu_2 = \mu_3$  (El arena con PAM arriba no absorbe más que el arena mezclada con PAM)

$\mu_2 \neq \mu_3$  (El arena con PAM arriba absorbe más que el arena mezclada con PAM)

Criterio: Se rechaza la hipótesis nula si  $t < -3.182$  ó  $t > 3.182$ , donde 3.182 es el valor de  $t_{0.025}$  para  $3+2-2 = 3$  grados de libertad.

$$\begin{array}{lll} \bar{x}_2 = 1894.850 & \bar{x}_3 = 1439.633 & \alpha = 95\% \\ S^2_2 = 235.445 & S^2_3 = 11525.14 & \end{array}$$

$$t = \left( \frac{1894.85 - 1439.633}{\sqrt{(11525.14)(2) + (235.445)}} \right) \left( \sqrt{\frac{(3)(2)(3)}{5}} \right) = 5.66$$

Conclusión: Como  $t = 5.66$  es mayor de  $3.182$  se rechaza la hipótesis nula y decimos que el arena con PAM arriba absorbe más agua que el arena mezclada con PAM.

Con  $\alpha = 80\%$

Conclusión:  $t = 5.66$  es mayor de  $1.638$ , por lo que la hipótesis nula se rechaza y decimos que el arena con PAM arriba absorbe más agua que el arena mezclada con PAM.

#### 5.8.5. Arena con PAM arriba vs arena con PAM abajo

Probar si las macetas con arena y PAM arriba absorben más agua que las macetas con arena y PAM abajo, suponiendo:

$$\mu_2 = \mu_4 \text{ (Hipótesis nula)} \qquad \mu_2 \neq \mu_4 \text{ (Hipótesis alterna)}$$

Donde:  $\mu_2 = \mu_4$  (El arena con PAM arriba no absorbe más que el arena con PAM abajo)

$\mu_2 \neq \mu_4$  (El arena con PAM arriba absorbe más que el arena con PAM abajo)

En una prueba anterior, al compararse la absorción entre las macetas con arena sola y las macetas con PAM abajo, se concluyó que el arena con PAM abajo no absorbía más agua que el arena sola, y dado que ya se demostró que el arena con PAM arriba absorbe más que el arena sola, podemos decir que el arena con PAM arriba va a absorber más que el arena con PAM abajo con los valores de  $\alpha = 95$  y  $80\%$ .

#### 5.8.6. Arena mezclada con PAM vs arena con PAM abajo

Probar si las macetas con arena mezclada con PAM absorben más agua que las macetas con arena y PAM abajo, suponiendo:

$$\mu_3 = \mu_4 \text{ (Hipótesis nula)} \qquad \mu_3 \neq \mu_4 \text{ (Hipótesis alterna)}$$

Donde:  $\mu_3 = \mu_4$  (El arena mezclada con PAM no absorbe más que el arena con PAM abajo)

$\mu_3 \neq \mu_4$  (El arena mezclada con PAM absorbe más que el arena con PAM abajo)

Como ya se comprobó anteriormente, el arena con PAM abajo no absorbe más agua que el arena sola y dado que el arena mezclada con PAM absorbe más agua que el arena sola, podemos concluir que las macetas con arena mezclada con PAM absorben más agua que las macetas con arena y con PAM

abajo para valores de  $\alpha = 95$  y  $80\%$ .

## 5.9. Costos y cantidades a emplear de la PAM

### 5.9.1. Opción A: PAM en surcos

Se tiene un terreno de cultivo de  $100 \times 100$ m (1ha) al cual se le construyen surcos con cama de 1.2m de base, 0.30m de altura, con una cama de 0.80m y de aproximadamente 0.3m de talud. Para calcular el área transversal del surco utilizamos la siguiente fórmula:

$$A = (\text{base mayor} + \text{base menor}) \times \text{altura} / 2 = (1.2 + 0.8) \times 0.3 / 2 = 0.30 \text{m}^2$$

Para obtener su volumen tenemos que:

$$V = \text{Área de la sección transversal} \times \text{la longitud} = (0.30)(100) = 30 \text{m}^3 = 30,000 \text{ℓ}$$

Ahora bien, dado que el distribuidor recomienda emplear 3g de PAM por litro de sustrato se calcula:

$$\text{PAM a emplear por surco} = (30,000)(0.003 \text{kg PAM}) = 90 \text{kg}$$

También se tiene que el costo de cada kilogramo de PAM es de \$250 (Rico, Sergio. 2005), entonces el costo de la PAM por surco es de:  $(90)(250) = \$22,500$

Como tenemos un terreno de  $100 \times 100$ m, el número de surcos que hay es:  $100 / 1.2 = 83$  surcos

La cantidad requerida de PAM por ha es de:  $(90)(83) = 7,500 \text{kg}$  de PAM.

E igualmente su costo por ha es de:  $(22,500)(83) = \$1,875,000$

Ahora bien, para calcular los beneficios y la rentabilidad que se podrían obtener al aplicar la PAM de esta forma, suponemos que la capacidad de absorción de agua del suelo y el polímero será la misma que la obtenida en las pruebas hechas en el laboratorio con las macetas. De esta forma, si 2.65ℓ de arena almacenan alrededor de 1,100mL de agua, entonces los 30,000ℓ de suelo de cada surco deben absorber alrededor de 12,453ℓ de agua.

Dado que en las pruebas realizadas en el laboratorio mostraron que la adición de PAM incrementa la absorción de agua en un 37%, equivalente a 4,608ℓ aproximadamente en este caso, tenemos que con esta opción cada surco podría retener un volumen total de agua de alrededor de 17,060ℓ.

Como el ha. cuenta con 83 surcos, el incremento total de agua absorbida es de:  $(4,608)(83) = 383,692\text{ℓ}$ . Esta cantidad equivale a un incremento en la lámina de agua aplicada de 38.4mm por ha.

Aunque el incremento que se logra en la absorción es relevante, podría quedar fuera del alcance de los productores debido al alto costo que supone adquirir la cantidad suficiente de polímero para aplicarlo de esta forma en todos los surcos, y este monto deberá añadirse a los costos de producción en que se incurran a lo largo de todo el proceso de siembra. Esta es la situación menos favorable y resulta económicamente inviable.

### 5.9.2. Opción B: PAM en surcos

Se tiene un terreno de cultivo de 100x100m (1ha) al cual se le construyen surcos con cama de 1.2m de base, 0.30m de altura, con una cama de 0.80m y de aproximadamente 0.3m de talud. El área de aplicación para la PAM en este caso será un espacio de 0.3m x 0.3m en la parte superior y central del surco, con el objeto de optimizar la aplicación del polímero al colocarlo sólo en el área más próxima a las raíces de las plantas.

Para calcular el área transversal de trabajo del surco utilizamos la siguiente fórmula:

$$A = (\text{lado} \times \text{lado}) = (0.30)(0.30) = 0.09\text{m}^2$$

Para obtener su volumen tenemos que:

$$V = \text{Área transversal} \times \text{la longitud} = (0.09)(100) = 9\text{m}^3 = 9,000\text{ℓ}$$

Ahora bien, dado que el distribuidor recomienda emplear 3g de PAM por litro de sustrato se calcula:

$$\text{PAM a emplear por surco} = (9,000)(0.003\text{kg PAM}) = 27\text{kg}$$

Tenemos que el costo de cada kilogramo de PAM es de \$250, por lo que el costo de la PAM por surco es de:  $(27)(250) = \$6,750$ .

Como tenemos un terreno de 100x100m, el número de surcos que hay es:  $100/1.2 = 83$  surcos

Sabemos que para cada surco son necesarios 27kg de PAM, por lo tanto la cantidad requerida por ha es de:  $(27)(83) = 2,250\text{kg}$  de PAM.

Y su costo por ha sería de:  $(6,750)(83) = \$562,500$

Para obtener el incremento probable en el volumen de agua absorbida primero calculamos el agua que podría retener el suelo, suponiendo, al igual que en el caso anterior, que su comportamiento será igual al que tuvo el arena durante las pruebas realizadas anteriormente en el laboratorio.

En este caso tenemos que el suelo podrían absorber alrededor de:  $(9,000)(1.1)/2.65 = 3,736\text{l}$  de agua.

Con este dato y sabiendo que el incremento en la absorción de agua obtenido con la PAM es del 37%, tenemos que el volumen total de agua que se podría retener mezclando el suelo y el polímero en cada surco de esta forma es de aproximadamente:  $1,382 + 3,736 = 5,118\text{l}$ .

Igualmente, como tenemos 83 surcos el incremento total de agua absorbida por ha es de:  $(1,382)(83) = 114,728\text{l}$ ; lo que equivale a incremento en la lámina de agua aplicada de 11.5mm por ha.

Así, el incremento del agua retenida resulta importante y el menor costo del polímero por ha lo hacen más viable para aplicarlo de esta forma por lo que podemos decir que esta es una situación medianamente favorable en cuanto a los beneficios y costos de aplicación a obtener.

Por otro lado, para este caso en particular, valdría la pena explorar la posibilidad económica de recubrir los surcos con un acolchado plástico para reducir las pérdidas de agua por evaporación del polímero y el suelo.

### 5.9.3. Opción C: PAM en macetas

Para conocer la rentabilidad de esta opción necesitamos conocer el volumen de las macetas, por lo cual tenemos que calcular su área. En este caso tomaremos como ejemplo los cálculos realizados con las macetas (botes) que se emplearon en las pruebas anteriores hechas con la PAM y el arena. Primero se calcula el área de la maceta:

$$A = \pi r^2 = \pi(0.075\text{m})^2 = 0.01767\text{m}^2$$

La profundidad a la que normalmente se trabajan los suelos es de 15cm, por lo que tomamos este dato como la altura que debe tener el suelo dentro de la maceta y a partir de él, podemos calcular el volumen de suelo que ésta contiene así como la cantidad de PAM que se necesita agregar según las recomendaciones del distribuidor:

$$V = \text{Área de la base} \times \text{altura} = (0.01767)(0.15) = 0.00265\text{m}^3 = 2.65\text{l}$$

El último paso lo suponemos, ya que dada la densidad relativa del arena ( $1.4\text{g/cm}^3$ ) podemos decir que 1ℓ equivale a 1.4kg, lo que nos da un peso aproximado de 3.71kg. Ahora bien, el distribuidor recomienda aplicar 3g de PAM por litro de sustrato lo que para nuestro volumen de trabajo corresponde a:

$$2.65 \times 3 = 7.95\text{g} \approx 8\text{g de PAM}$$

Por otro lado, sabemos que el precio del polímero es de \$250 el kilo, lo que nos da un costo por gramo de \$0.25. En este caso, si pensamos aplicar 8gr de PAM el costo para cada maceta es de \$2.

Como se vio anteriormente en los resultados obtenidos de los experimentos hechos en el laboratorio, este volumen de arena es capaz de absorber alrededor de 1,100mL de agua y la PAM proporciona un 37% más de capacidad de retención, lo cual nos da una capacidad de absorción total de:  $1,100 + 407 = 1,507\text{ml}$

Ahora bien, de acuerdo los valores anteriores tenemos que por cada 1000g de PAM se pueden preparar 125 macetas, con lo que se pueden mayores ventajas al emplearlo de esta forma en condiciones de ornato o en invernaderos, en los cuales además se tiene un mayor control de las características tanto del agua como del suelo utilizados. Así, se considera que esta es la situación más favorable en beneficios y costos que puedan obtenerse con su empleo.

## 6. CONCLUSIONES

Los datos obtenidos con este trabajo nos permiten decir que, en apariencia, los volúmenes de absorción indicados por las empresas distribuidoras para la PAM se encuentran muy elevados, ya que las pruebas muestran claramente las dificultades del polímero para lograr, al menos, un volumen de absorción de 400 veces su peso.

Por otro lado, en los diferentes sitios de información sobre el producto se indica que los máximos volúmenes de absorción del polímero se alcanzan utilizando agua destilada o desmineralizada, pero no advierten sobre la disminución que sufre en esta propiedad si se utiliza agua con sólidos o sales disueltos, si debe competir con las partículas de suelo por las moléculas de agua o si se encuentra bajo la presión del suelo, situaciones a las cuales se vería sometida la PAM de emplearse en la agricultura de riego.

El tamaño de los cristales puede ser importante para su capacidad de absorción ya que mientras más pequeño es el cristal mayor es el volumen que pueden retener y viceversa, pudiendo concluir con base en las observaciones, que los cristales de PAM fina absorben un mayor volumen de agua por unidad de tiempo que los cristales de PAM gruesa.

En el caso de las macetas con arena y las diferentes formas de aplicación del polímero, las observaciones y el análisis estadístico de las pruebas realizadas, nos permiten decir que el arena sola y el arena con PAM abajo fueron las pruebas con la menor capacidad de absorción, no existiendo diferencias significativas en cuanto al volumen de agua absorbido entre ambas.

Las pruebas con la mayor capacidad de absorción resultaron ser aquéllas con el arena y la PAM mezcladas y donde la PAM se colocó en la parte superior del arena, siendo ésta última la prueba con la mayor capacidad de absorción de todas. La gran desventaja que presenta el colocar el polímero en la parte superior del arena es que, una vez hidratada, queda muy expuesta a las condiciones ambientales, a los rayos del sol y ofrece una superficie muy amplia para la evaporación.

De esta forma, la mejor opción de aplicación resultó ser en donde el arena y la PAM se mezclaron ya que así los cristales de polímero quedaron más protegidos del medio ambiente y de los rayos del sol, además de que su mejor distribución en todo el volumen de suelo permitiría aprovechar mejor el agua contenida en ellos por las raíces de las plantas.

Ahora bien, es posible que los cristales de PAM absorban las cantidades de agua especificadas, pero para ello sería necesario que ambos elementos estuvieran en contacto durante periodos mayores a 5 hrs. y con exceso de agua, ratificando lo encontrado por Nissen en 1997, condición que no especifican los distribuidores. Igualmente, se indica que los cristales de polímero pueden conservar el agua absorbida durante varias semanas o meses con un almacenaje adecuado, pero las pruebas mostraron que presenta una gran incapacidad para resistir las pérdidas de humedad si se encuentran a la intemperie, lo que minimiza las ventajas que podrían conseguirse con ellos.

En cuanto a la conveniencia económica de utilizar la PAM en la agricultura de riego las cantidades requeridas por hectárea cultivada, el precio relativamente elevado del polímero, las afectaciones que sufre tanto por la presión del suelo como por las sales y partículas presentes en el suelo y el agua de riego, nos permiten concluir que los cristales de poliacrilamida no resultan viables técnica y económicamente para ser empleados en las tierras agrícolas de riego y hacer más eficiente el aprovechamiento del agua, sin importar el tamaño de los cristales utilizados o su forma de aplicación.



## 7. RECOMENDACIONES

En vista de las limitaciones que presenta la PAM para absorber y retener el agua mostradas en este trabajo, y que la hacen inviable para su utilización en grandes extensiones de terreno, su empleo se limitaría a actividades en las que se tenga cierto control de las características tanto del suelo como del agua empleada.

Lo más recomendable sería usarla en aquellos tipos de plantas que se siembren en suelos poco profundos, como en algunas técnicas de cultivo donde las semillas o plántulas se colocan en camas hasta que alcanzan un determinado tamaño y posteriormente son transplantadas a recipientes mayores. En este caso, la PAM puede mezclarse en pequeñas cantidades en el suelo que contiene las semillas o plántulas y en su posterior trasplante puede añadirse, en una única aplicación, a las raíces o al suelo que contendrá las plantas. Los cristales ya deben estar hidratados al momento de la adición para asegurar su máximo volumen de absorción y de aprovechamiento por las plantas.

Otra forma de uso puede ser en aquellas plantas que se encuentran en macetas y van a estar un tiempo relativamente largo sin regarse. La forma de aplicación sería la misma del párrafo anterior.

Uno de los cuidados recomendados es el que los cristales de PAM no se expongan a la luz directa del sol, ya que esto acelera su degradación e incrementa sus pérdidas de humedad por evaporación. También se debe evitar el que los cristales se sequen por completo porque pueden formarse costras de suelo o de sales en su superficie, disminuyendo la capacidad de absorción del polímero y acortando su vida útil.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. Eldon A. Smith; Susan L. Prues; Frederick W. Oehme. 1995. Environmental Degradation of Polyacrylamides. 1. Effects of Artificial Environmental Conditions: Temperature, light and pH. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 35. p. 121-135.
2. Nissen M, Juan; Araya S, Elias. 1998. Caracterización físico-hídrica de dos poliacrilamidas de uso agrícola (acrilato de sodio; acrilato de potasio). *Simiente*. INIA/Chile. p. 52-67
3. Nissen M, Juan; Tapia F, Jaime. 1996. Effects of a polymer as a soil conditioner on mineral nutrition of ryegrass (*Lolium multiflorum*), on a volcanic ash soil. *Agro-Sur*. INIA/Chile. p. 206-212
4. Teo, James A.; Chittaranjan Ray; Samir A. El-Swaify. 2006. Screening of polymers on selected Hawaii soils for erosion reduction and particle settling. *Hydrol. Process* 20. p. 109-125
5. Green, V. Steven; Stott, D. E. 1999. Polyacrylamide: A review of the use, effectiveness and cost of a soil erosion control amendment. *USDA-ARS*. p. 24-29
6. Peña P., Efrén. 2007. Eficiencias del agua de riego en los distritos de riego. *El Acueducto*. IMTA/México. Julio No. 3
7. Effective erosion fighter and infiltration enhancer but not a conserver of water. Escrito elaborado por Laosheng Wu, asistente CE y Especialista en Manejo de Agua, que explica las ventajas obtenidas al aplicar la PAM en un suelo de textura arcillosa.
8. Conferencia realizada en la ENEP Aragón en el 2003 por Sergio Rico, Director de REDI , enumerando las ventajas que se pueden obtener al utilizar el acrilato de potasio. <http://bine.org.mx/?q=node/577>
9. Trabajo presentado en la Revista Iberoamericana de Polímeros Vol. 5(1), Marzo de 2004, realizado por Blanca Rojas de Gáscue y cols., sobre el "Estudio de la germinación de semillas de tomate en suelos áridos extraídos de la Península de Araya (Venezuela) al utilizar polímeros de tipo hidrogeles". [www.ehu.es/reviberpol/pdf/MAR04/Blanca2004pdf](http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/MAR04/Blanca2004pdf)
10. Informe realizado por los Ings. Agrs. Rodolfo Mon, Carlos B. Irurtia y Adrián Andriulo del Instituto de Suelos del INTA en Argentina sobre "Aplicación de poliacrilamida (PAM) sobre un suelo con riego suplementario". [www.inta.gov.ar/suelos/info/documentos/informes/aplicación\\_PAM.htm](http://www.inta.gov.ar/suelos/info/documentos/informes/aplicación_PAM.htm)
11. Página con información sobre poliacrilatos, como la PAM. <http://pslc.ws/spanish/acrylate.htm>
12. Reporte hecho por Joe Cummins, Profesor del departamento de Biología en la University of Western Notario, titulado "Polyacrylamide is added to soil and pesticides, it may be a major problem?". [www.mindfully.org/Pesticide/2002/Polyacrylamide-Soil-Pesticides-Cummins8aug02.htm](http://www.mindfully.org/Pesticide/2002/Polyacrylamide-Soil-Pesticides-Cummins8aug02.htm)
13. Proyecto de investigación publicado en Peer Reviewed Journal, Marzo 1 de 2007, por Robert E. Sojka y cols., titulado "Polyacrylamide (PAM) in agriculture and environmental land management". [www.ars.usda.gov/research/publications/publications.htm?seq\\_no\\_115=197872](http://www.ars.usda.gov/research/publications/publications.htm?seq_no_115=197872)
14. Biblioteca de Consulta Microsoft® Encarta® 2002. © 1993-2001 Microsoft Corporation.

15. Reporte hecho por la CNA sobre las diferentes formas de aprovechar y convivir con el agua del Valle de México, desde la época prehispánica a la actualidad, y explicando la evolución de la problemática y la situación del agua en el Valle hoy en día. [http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Regionales/GRAVAMEX/publicaciones/2a%20Parte\\_Panorama%20del%20Agua%20en%20el%20Valle%20de%20M%C3%A9xico.pdf](http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Regionales/GRAVAMEX/publicaciones/2a%20Parte_Panorama%20del%20Agua%20en%20el%20Valle%20de%20M%C3%A9xico.pdf)
16. Conagua. Estadísticas del Agua en México, 2007. Ed. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. ed. 1ª, 2007. México, D.F.
17. Millar, Irwin R. y Cols. Probabilidad y estadística para ingenieros. Ed. Prentice-Hall Hispanoamericana, ed. 4ª. México, 1992.
18. Milton, Susan J. Probabilidad y estadística con aplicaciones para ingeniería y ciencias computacionales. Ed. Mc Graw Hill, ed. 4ª . México, 2004.
19. [www\\_hidrogel\\_com\\_mx](http://www_hidrogel_com_mx). Página de la empresa Comercializadora Internacional México en donde se indican las propiedades físicas, presentaciones y formas de uso de su producto Acua-gel (Poliacrilamida).
20. [Auxiliares para agriculturaAquasorbbyFlobond.htm](http://Auxiliares_para_agriculturaAquasorbbyFlobond.htm). Página de la empresa SNF Floerger en la que se indican las propiedades físicas, presentaciones y formas de aplicación de su producto AQUASORB (Poliacrilamida)