



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

---

---

Instituto de Ciencias

Centro de Agroecología

Maestría en Manejo Sostenible de Agroecosistemas

RETENCIÓN DE HUMEDAD POR ENMIENDAS  
ORGÁNICAS EN EL SUELO CULTIVADO CON  
*Amaranthus hypochondriacus* L.

**TESIS**

Que para obtener el grado de

Maestro en Manejo Sostenible de Agroecosistemas

Presenta

EDITH GABRIELA AQUINO FLORES

Director de la Tesis

Dr. DIONICIO JUÁREZ RAMON

Puebla, Pue.

Junio, 2016

ACTA DE  
APROBACIÓN DE  
TESIS

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca que me otorgó para realizar mis estudios de maestría.

Un agradecimiento a Alternativas y Procesos de Participación Social A.C., especialmente al Grupo de Empresas Sociales Cooperativas Quali y al Museo del Agua por su invaluable apoyo en el establecimiento y desarrollo de la parte experimental de este trabajo.

Finalmente agradezco a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado (VIEP) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por su apoyo para lograr que la experiencia académica pueda ser adquirida más allá de nuestras fronteras.

## **AGRADECIMIENTOS PERSONALES**

Al Dr. Dionicio Juárez Ramón por su incansable apoyo para lograr concluir este proyecto.

A mi comité tutorial por las aportaciones a la investigación. Especialmente al Dr. Hernández Aldana por su ayuda y aliento en este proceso. Al Dr. Miguel Ángel Gómez Albores por sus enseñanzas y toda la confianza depositada en mí.

Al Dr. Andrés Martínez de Azagra por su invaluable instrucción y acogimiento que me han enriquecido no solo de forma académica sino personal.

Al amor de mi madre y hermanas, los pilares de mi vida.

## **DEDICATORIA**

*A mi abuelita*

*Porque siempre estás en mi corazón aunque hoy faltes, porque estoy aquí para ser digna de todo el amor que me brindaste.*

*A mi madre*

*Gracias por la espera y lucha incansable, por la motivación constante, por ser un ejemplo de superación y entrega, pero sobretodo, gracias por tu amor. Todo esto te lo debo a ti.*

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE CUADROS.....</b>	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>vii</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>viii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>ix</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>I</b>
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	2
JUSTIFICACIÓN .....	3
OBJETIVOS .....	4
<i>General.....</i>	<i>4</i>
<i>Particulares.....</i>	<i>4</i>
HIPÓTESIS .....	5
<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>6</b>
PANORAMA GENERAL DEL AGUA .....	6
HUMEDAD EN EL SUELO .....	10
<i>Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchitez Permanente (PMP)...</i>	<i>12</i>
EL CULTIVO DE AMARANTO .....	14
<i>Descripción .....</i>	<i>14</i>
<i>Etapas Vegetativas.....</i>	<i>15</i>
<i>Distribución .....</i>	<i>16</i>
<i>Usos.....</i>	<i>18</i>
RETENEDORES DE HUMEDAD .....	19
MATERIALES ORGÁNICOS .....	21
<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>24</b>
DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO .....	24
DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....	26
DISEÑO EXPERIMENTAL.....	26
ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	30
<b>RESULTADOS.....</b>	<b>33</b>
CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES .....	33
RETENCIÓN DE HUMEDAD DE LOS TRATAMIENTOS EN SEQUÍA INDUCIDA .....	35
EFECTOS DE LOS TRATAMIENTOS SOBRE EL DESARROLLO VEGETATIVO .....	36
MATERIA SECA Y PRODUCCIÓN DE GRANO .....	38

<b>DISCUSIÓN.....</b>	<b>41</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>45</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Descripción y función de los poros del suelo .....	12
Cuadro 2. Indicadores agroclimáticos y categorización del cultivo de <i>Amaranthus spp.</i> ...	15
Cuadro 3. Tratamientos evaluados, de los cuales se busca el mejor efecto de retención de humedad en el suelo. ....	28
Cuadro 4. Caracterización fisicoquímica del suelo .....	33
Cuadro 5. Resultados de la caracterización de los materiales orgánicos.....	33
Cuadro 6. Contenido de humedad en suelo por tratamiento respecto al periodo de sequía inducida .....	35
Cuadro 7. Efectos de los tratamientos sobre las variables: número de plantas sobrevivientes, altura de las plantas y diámetro de tallo. ....	37
Cuadro 8. Materia seca total de acuerdo al tratamiento evaluado .....	38

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Balance hídrico en México (SEMARNAT, 2011).....	8
Figura 2. Grado de presión sobre el recurso hídrico (CONAGUA, 2012).....	9
Figura 3. Área con sequía en México 2003-2015 (CONAGUA, 2015).....	10
Figura 4. Esquema de las etapas vegetativas del cultivo de amaranto .....	16
Figura 5. Distribución geográfica de la especie <i>Amaranthus</i> en México (Espitia-Rangel <i>et al.</i> , 2010).....	17
Figura 6. Estructura del Poliacrilato de Potasio .....	19
Figura 7. Hidratación del hidrogel.....	20
Figura 8. Ubicación del área de estudio .....	24
Figura 9. Modelo de la temperatura en la cuenca de la zona de estudio .....	25
Figura 10. Modelo de la Precipitación anual en la cuenca de la zona de estudio.....	25
Figura 11. Unidades experimentales en la parcela .....	27
Figura 12. Distribución de los tratamientos en las unidades experimentales en campo. ....	29
Figura 13. Esquema metodológico de la investigación .....	32
Figura 14. Curva de retención de humedad de los materiales orgánicos .....	34
Figura 15. Espectro infrarrojo transformada de Fourier (IRTF) del gel retenedor.....	34
Figura 16. Variación del contenido de humedad a diferentes profundidades .....	36
Figura 17. Efecto del número de días de sequía sobre el rendimiento (g) de materia seca y de grano de amaranto en cada tratamiento; R–tratamiento = con retenedor; S–tratamiento = sin retenedor; S= suelo solo.....	40
Figura 18. Temperatura del suelo y temperatura y humedad ambientales durante el mes de abril, en el sitio de estudio. ....	43
Figura 19. Comportamiento de la radiación a lo largo del día. ....	44

## RESUMEN

Se llevó a cabo un experimento en campo para determinar el efecto de diferentes materiales orgánicos (rastrajo de maíz, rastrajo de amaranto, estiércol de chivo, composta y alfalfa como abono verde) solos y en combinación con un hidrogel mezclados en los primeros 10 cm de profundidad con el suelo para la retención de humedad; los tratamientos fueron sometidos a diferentes periodos de sequía para observar sus efectos en plantas de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.). Se probaron 14 tratamientos en un diseño experimental completamente al azar con 10 repeticiones por tratamiento. Los efectos agronómicos considerados fueron estimados con las variables: diámetro de tallo, altura de la planta y sobrevivencia de las plantas. Como resultados se observó que la aplicación de materiales orgánicos no tuvo efectos significativos en la humedad del suelo entre 5-10 cm de profundidad. En los parámetros vegetativos evaluados, la aplicación de un hidrogel tiene efectos estadísticamente significativos en la sobrevivencia de las plantas ( $p < 0.05$ ). El acolchado orgánico (rastrajo de maíz) junto con el abono verde (alfalfa) y el rastrajo de maíz solo, son los tratamientos con mejores resultados tanto para diámetro de tallo como altura de la planta (prueba de Tukey,  $\alpha = 0.05$ ). El rastrajo de amaranto tuvo un número superior de plantas por unidad experimental ( $7.9 \pm 0.2$ ) con respecto a los demás tratamientos, de igual forma en materia seca total (Tukey,  $\alpha = 0.05$ ). Todas las variables agronómicas presentaron diferencias estadísticamente significativas de acuerdo a los periodos de no-riego entre 0 y 15 días, siendo más óptimas aquellas sin estrés hídrico. No hubo diferencias estadísticamente significativas en cuanto a rendimiento de grano por sequía inducida, retenedor o material orgánico. Son necesarios más estudios para conocer el efecto de la sequía inducida en otros periodos del ciclo de cultivo.

## ABSTRACT

A field experiment was conducted to investigate the effect of different organic amendments (corn stubble and amaranth stubble, goat manure, compost, and green fertilizer - *Medicago sativa*), alone and in combination with a hydrogel, into the moisture retention of the soil, deposited over the soil surface and mixed with surface soil, making a total of 14 treatments. To test their effects, the amaranth plants (*Amaranthus hypochondriacus* L.), were subjected to different periods of drought. Considered as tolerant to the drought and estimating their vegetative development for leaf production, the treatments were proven under random arrays with 10 repetitions. The agronomic variables considered were, height and survival of the plants as well as their stem diameter. The amendments do not present significant effects on the retention of moisture at 5 cm soil depth. In relation to the vegetative parameters, the hydrogel application demonstrates significant statistical differences for the survey of the plants ( $p > 0.05$ ). The amendments evaluated under the organic padding conditions with corn stubble, in conjunction with the green *Medicago sativa* fertilizer and the corn stubble mixed with soil, were the treatments which present the best results, in both stem diameter and plant height (Tukey's test,  $\alpha = 0.05$ ). All the variables show significant statistical differences according to the drought periods of between 0 and 15 days, applied to the different essays. There were no statistically significant differences in weight of grain according to the degree of induced drought, use of hydrogel or type of organic material. More studies are needed to determine the effect of induced drought in other periods of the crop cycle.

# INTRODUCCIÓN

De la disponibilidad de agua en el mundo tan solo el 2.5% es agua dulce. De la cual, únicamente el 30% es apta para el consumo humano, y el resto se encuentra en forma de glaciales, nieve o hielo (SEMARNAT, 2011). La pequeña porción del agua disponible está en los lagos, los ríos, la humedad del suelo y en depósitos subterráneos relativamente poco profundos, de los cuales, la mayoría se encuentra lejos de las zonas pobladas dificultando su acceso y utilización efectiva.

Aunado a lo anterior, la contaminación de cuerpos de agua y el creciente aumento de la población nos presentan un escenario de creciente escasez de agua, entendiendo la escasez como un exceso de demanda de agua para el suministro disponible (FAO, 2013).

La agricultura es la principal actividad consumidora de agua del planeta (70%), que hoy en día sigue desempeñándose con un irrisorio rendimiento en términos de eficiencia del uso del agua, es decir, poca efectividad de la relación entre el agua de riego absorbido por las plantas y la cantidad de agua extraída realmente de su fuente con fines de riego (UNESCO, 2006). La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO (Food and Agriculture Organization por sus siglas en inglés) estima que a nivel global la eficiencia del uso del agua para riego se sitúa en torno al 38% en los países en vías de desarrollo, y en las próximas décadas sólo prevé un leve crecimiento en la eficiencia del uso del agua a nivel global.

La gestión del agua es esencial para la estabilidad de la producción mundial de alimentos, que de igual forma está íntimamente ligada con la pobreza. De acuerdo con el Banco Mundial: “Para el 70% de los pobres del mundo que viven en zonas rurales, la agricultura es la principal fuente de ingresos y de trabajo. Pero el agotamiento y la degradación de la tierra y del agua afectan gravemente la capacidad de cultivar alimentos y otros productos necesarios para sustentar los medios de vida en estas zonas y satisfacer las necesidades de la población urbana”.

Alimentar de forma adecuada a la población implica producir el tipo de alimentos que faltan para garantizar la seguridad nutricional, sin el derecho a la alimentación no puede asegurarse

ni la vida, ni la dignidad humana, ni el disfrute de otros derechos humanos. El acceso a alimento adecuado en las zonas rurales de muchos países en vías de desarrollo depende de forma sustancial del acceso a los recursos naturales, incluido el agua.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En México, el 76.7% del agua se destina a la agricultura (SEMARNAT, 2011), aunado al aumento de la demanda por distintos sectores, al consumo de mayores cantidades de alimentos, se necesitan cantidades crecientes de agua para su producción.

El 48% de nuestro país presenta condiciones de humedad no aptas para lograr sostener al menos un ciclo de cultivo al año. Las tierras áridas constituyen el 52% del país, sólo el 36% de tierras tienen la inclinación adecuada para el cultivo agrícola y se aprovecha solamente el 18% de las aguas de los ríos. Las lluvias constituyen la principal fuente de agua para todos los usos humanos y de los ecosistemas, pero el 73.1% del agua que se precipita se pierde por evaporación (CONAGUA, 2012). Resulta imperante crear manejos eficientes a fin de reducir y retener la mayor cantidad posible de agua a modo que se logre obtener una cosecha formal de los cultivos.

En la región semiárida de la mixteca, al interior de la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán, la siembra de amaranto se realiza de forma orgánica, cuya práctica va acompañada necesariamente de técnicas de conservación y aprovechamiento del agua, la investigación para hacer un manejo eficiente del agua se vuelve vital por las condiciones ambientales de la zona.

Cabe resaltar, que todas las mejoras en la gestión del agua agrícola tiene múltiples efectos, no sólo en el aumento en la productividad y la producción, sino en la generación de empleo, poder mantener los precios de los alimentos dentro de la gama asequible para los pobres rurales y urbanos, la reducción de la vulnerabilidad, efectos nutricionales, impactos de equidad, y efectos sobre el medio ambiente y la salud humana (Namara *et al.*, 2010).

## JUSTIFICACIÓN

Siendo la agricultura la principal actividad en el país a la que se destina el 76.7% del agua dulce, resulta sustancial la investigación en esta área para conocer las necesidades de agua de los cultivos, obtener el mejor resultado de las tecnologías de riego disponibles y desarrollar nuevas tecnologías capaces de mejorar la aplicación del agua. En el caso de la retención de humedad en el suelo, una alternativa sostenible puede ser la aplicación de materiales orgánicos, y la implementación de alternativas tecnológicas como los hidrogeles. Es importante evaluar la capacidad de estos materiales y combinación de ellos para mejorar los rendimientos productivos de diferentes cultivos y así evitar las pérdidas por evaporación de hasta un 73.1%. El amaranto es un alimento que ha sido revalorizado en las últimas décadas por su gran calidad nutricional, el cultivo de amaranto es un cultivo prometedor en zonas áridas, del que se debe analizar las condiciones de humedad en suelo para una producción redituable para los agricultores en zonas con recursos hídricos limitados.

## OBJETIVOS

### *General*

Evaluar diferentes métodos de retención de agua en el suelo para mantener una humedad adecuada en el sistema radicular de la planta de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*), que permita lograr un rendimiento aceptable para los agricultores.

### *Particulares*

- Caracterizar los materiales utilizados en el trabajo en campo – enmiendas orgánicas y suelo – a través de análisis físico-químicos (pH, %MO, CC, PMP, textura, curva de retención de humedad).
- Identificar la composición del hidrogel mediante un análisis de espectrofotometría de IR
- Comparar el comportamiento de la capacidad de retención de humedad de diferentes compuestos orgánicos en campo, mediante el análisis de contenido de humedad en suelo por método gravimétrico durante 15 días.
- Determinar el efecto de la aplicación de un retenedor hídrico en la retención de humedad en suelo cultivado con amaranto, mediante el análisis de contenido de humedad en suelo por método gravimétrico durante 15 días del ciclo de cultivo.
- Medir el efecto de la humedad de los tratamientos y sequía inducida aplicados al cultivo, en las variables agronómicas: sobrevivencia, diámetro de tallo, altura de la planta y materia seca.
- Conocer las diferencias de la humedad a las profundidades de 5-10, 10-20 y 20-30 cm de los tratamientos aplicados posterior al periodo de sequía inducida, con muestreos de suelo y análisis gravimétrico de humedad.
- Cuantificar el peso de los granos obtenidos por cada tratamiento a fin de identificar el tratamiento idóneo en la producción de amaranto.

## HIPÓTESIS

La aplicación de materiales orgánicos en combinación con el uso de un hidrogel potencia los efectos de retención de humedad en el suelo cultivado. Una combinación de estiércol de caprino con hidrogel, redundará en efectos de conservación de la humedad en el suelo cultivado por más tiempo, mejora la conservación de humedad en el suelo cultivado en la profundidad de aplicación y produce mayor cantidad de grano en el cultivo del amaranto. Asimismo una combinación con otros materiales como el abono verde e hidrogel, inducen a mayor crecimiento y desarrollo de las plantas de amaranto, así como en la materia seca total.

# MARCO TEÓRICO

## PANORAMA GENERAL DEL AGUA

Desde principios del siglo XX, el agua utilizada por la industria y por los municipios ha ido en aumento. A medida que el mundo se ha ido enriqueciendo e industrializando, cada uno de sus habitantes ha ido utilizando una mayor cantidad de agua. Sin embargo, aunque la demanda mundial de agua creció, hoy día, como desde las civilizaciones antiguas, el riego y la agricultura continúan siendo las actividades dominantes del uso del agua. En los países en desarrollo, la agricultura todavía representa más del 80% del consumo de agua (PNUD, 2006).

El balance de agua en el campo está relacionado fuertemente con los procesos hidrológicos en la superficie de la tierra, que actualmente están siendo afectados por el cambio climático global. De acuerdo con la UNESCO (2005), los recursos hídricos y la degradación de suelos son el principal factor que atenta contra la sostenibilidad de la utilización agrícola de las tierras en América Latina.

Si bien la escasez de agua se refiere a no contar con agua suficiente para satisfacer las necesidades domésticas o las demandas de las ciudades, resulta importante destacar su relación con el sector agrícola. La producción de alimentos requiere una cantidad de agua aproximadamente 70 veces mayor que la que la gente usa para fines domésticos. Resaltando que algunos alimentos requieren más agua que otros, se necesita una cantidad de agua ocho veces mayor para cultivar una tonelada de azúcar que una tonelada de trigo. La producción de una sola hamburguesa demanda alrededor de 11.000 litros, aproximadamente la cantidad diaria disponible para 500 personas que viven en un barrio pobre urbano con viviendas sin conexión a la red de abastecimiento de agua. Estos hechos ayudan a explicar el porqué del aumento en el nivel de ingresos y los cambios en la dieta - mayor consumo de carne y azúcar - mantienen el crecimiento del uso del agua por encima del crecimiento demográfico.

Para el año 2050, se necesitará aumentar la producción global de alimentos en un 70%, que implica cerca de un 100% en los países en desarrollo con respecto al 2009 (FAO, 2011) para hacer frente al incremento del 40% de la población mundial, y al aumento en el consumo de comida a 3130 kcal por persona al día. Este escenario se traduce en un billón de toneladas de cereales más y 200 millones de toneladas de carne que se necesitarán producir

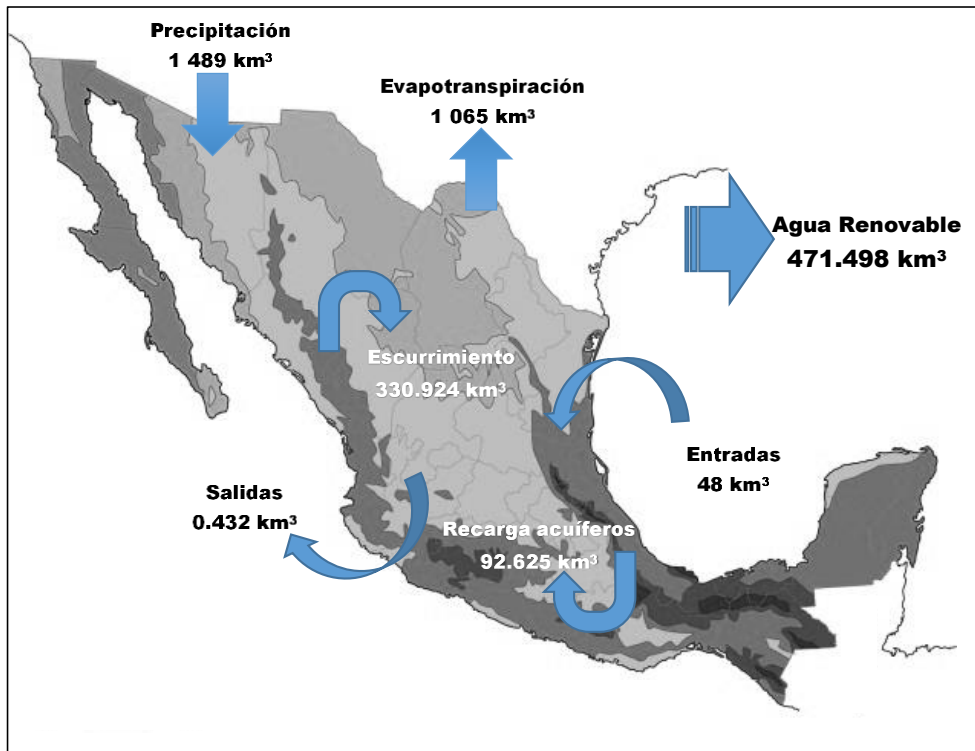
anualmente, con respecto al 2005 (Bruinsma, 2009). Algunos países que tendrán un rápido crecimiento en la demanda de comida serán aquellos que también enfrenten altos niveles de escases de tierras y agua, ya que no se prevé un crecimiento de las áreas de cultivo.

Satisfacer las necesidades de agua de una población en crecimiento a la vez que se protegen los ecosistemas naturales de los cuales depende la vida misma es una condición crucial para el desarrollo sostenible. Abordar este desafío implica hacer que la gestión del agua para riego sea más eficiente e inteligente, reemplazando el agua por tecnología y conocimiento.

La escasez de agua ha comenzado a generar soluciones tecnológicas innovadoras. A nivel mundial, las tecnologías para conservar el agua se concentran en países desarrollados en parte por los gastos de inversión que suponen. Dentro de los países, el acceso a innovaciones que permitan un ahorro de agua exige acceso a capital, conocimiento y una infraestructura más amplia. Los agricultores pobres de áreas marginales son los que tienen menor probabilidad de tener acceso a estos activos (PNUD, 2006).

En México, la Ley de Aguas Nacionales en el artículo 14 Bis 5 enumera: “El agua es un bien de dominio público federal, vital, vulnerable y finito, con valor social, económico y ambiental, cuya preservación en cantidad y calidad y sustentabilidad es tarea fundamental del Estado y la Sociedad, así como prioridad y asunto de seguridad nacional”. Sin embargo, la gestión del agua aún no ha alcanzado los niveles deseados que permitan conseguir la sustentabilidad del recurso (Ley de Aguas Nacionales, 2004).

En nuestro país, el volumen promedio de agua que se obtiene por precipitación cada año es de 1489 km<sup>3</sup>, pero la mayor parte (71.6%) regresa a la atmósfera por evapotranspiración. México recibe por importaciones 48.381 km<sup>3</sup> y exporta 0.432 km<sup>3</sup>. De esta forma, el país anualmente cuenta con 471.5 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable (Figura 1).

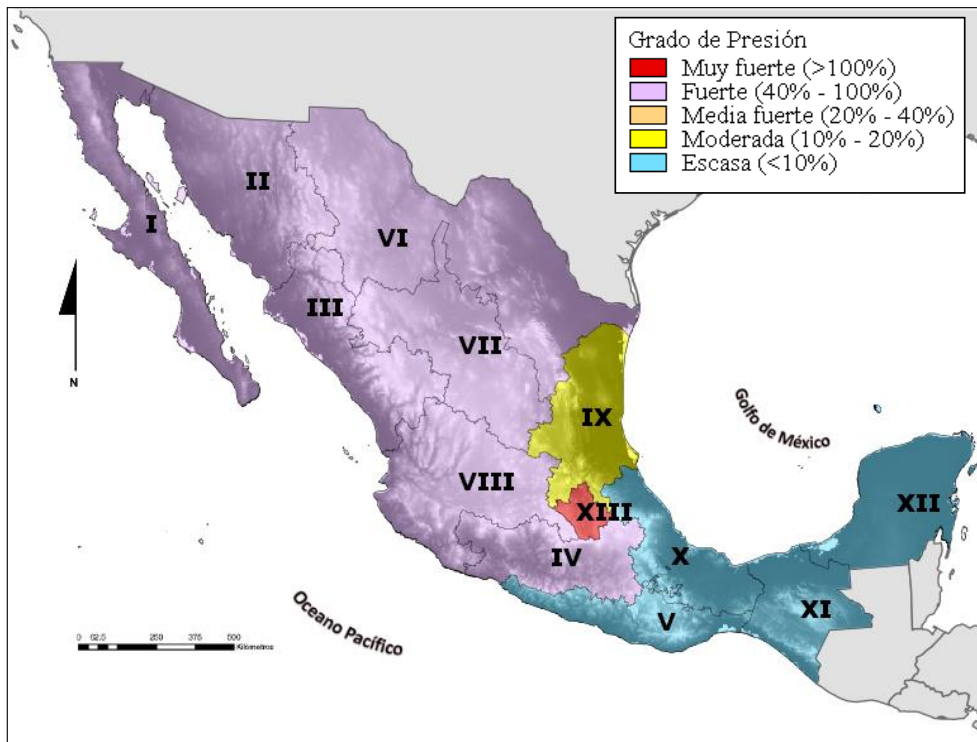


**Figura 1. Balance hídrico en México (SEMARNAT, 2011)**

Algunas condiciones a las que se enfrentan los agricultores en nuestro país implican considerar que el 48% de territorio nacional presenta condiciones de humedad no aptas para lograr sostener al menos un ciclo de cultivo al año. Las tierras áridas y semiáridas constituyen dos terceras partes del país, sólo el 36% de tierras tienen la inclinación adecuada para el cultivo agrícola y se aprovecha solamente el 18% de las aguas de los ríos. Las lluvias constituyen la principal fuente de agua para todos los usos humanos y de los ecosistemas, pero el 71.6 % del agua que se precipita se pierde por evapotranspiración (CONAGUA, 2014). También es importante destacar que el 67% de la lluvia se presenta en tan solo cuatro meses del año, lo que dificulta el aprovechamiento y ha obligado a la construcción de la infraestructura necesaria para la captación y distribución del líquido.

Cabe resaltar que el mayor crecimiento poblacional y económico se ha generado en las zonas con menor disponibilidad de agua; es en el centro y norte del país con el 31% de la disponibilidad de agua nacional donde se concentra el 77% de la población, a diferencia de la zona sureste, donde el 23% de la población cuenta con del 69% del recurso disponible (CONAGUA, 2012).

En la Figura 2, se presenta el grado de presión que se ejerce sobre el recurso hídrico en nuestro país, un porcentaje que representa el agua utilizada para usos consuntivos respecto al agua renovable. Si este indicador es mayor al 40% se ejerce una fuerte presión sobre el recurso, caso que se presenta en la mayor parte del territorio nacional.



**Figura 2. Grado de presión sobre el recurso hídrico (CONAGUA, 2012)**

Entre las causas más importantes que generan la escasez de agua encontramos las relacionadas con el uso indiscriminado, la contaminación, la degradación del medio ambiente y de las reservas hídricas, sequías, el crecimiento de la población mundial, la distribución desigual de los recursos, así como, la ineficacia en la elaboración y ejecución de políticas públicas en la materia e incluso la inexistencia de las mismas (FUSDA, 2008).

Los sistemas agrícolas deben adaptarse a una situación actual, producir mayor cantidad de alimentos con una mejor calidad con condiciones más desfavorables, cuidando el medio ambiente y la biodiversidad.

## HUMEDAD EN EL SUELO

El suelo está compuesto por partículas inorgánicas (minerales) y materia orgánica. La fracción orgánica comprende los organismos vivos del suelo (flora y fauna) y el humus que lo conforman los restos vegetales y animales del suelo, sometidos constantemente a procesos de descomposición y transformación. El espacio poroso es ocupado por gases (aire o vapor de agua) y una fase líquida o solución del suelo; que la conforman el agua y diferentes proporciones de iones.

Un suelo ideal contiene alrededor de un 25% de agua, el factor de suelo más importante que controla el rendimiento en gran parte de las regiones es la cantidad de agua disponible para las plantas.

La baja producción y pérdida de los cultivos en la agricultura de secano está relacionada con la intensidad y frecuencia de las precipitaciones. Sin embargo, en muchas áreas el manejo de tierras y cultivos no favorecen el flujo del agua en la zona radical del cultivo. Por ello, los bajos rendimientos están relacionados con una insuficiencia de la humedad del suelo más que con una insuficiencia de la lluvia.

La sequía en México puede llegar a afectar cerca de la mitad del territorio nacional (45.21% en septiembre de 2015), la Figura 3 muestra la evolución y el porcentaje de área del país afectada con una o varias categorías de sequía a nivel nacional a partir del 2003.

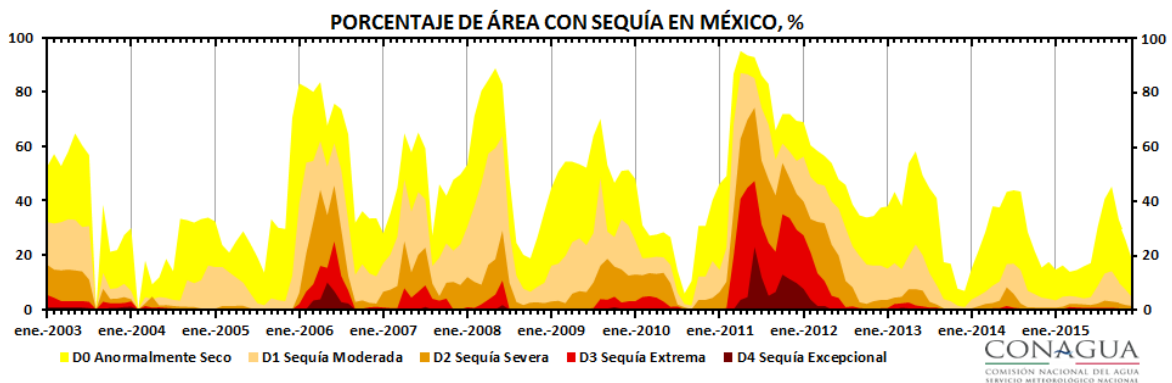


Figura 3. Área con sequía en México 2003-2015 (CONAGUA, 2015)

El agua que precipita y llega al suelo puede infiltrarse incorporándose al agua del suelo a una tasa de infiltración influenciada por el contenido de agua y principalmente por la estructura de poros del suelo, puede escurrir como un flujo de agua superficial (cuando la intensidad de la lluvia es mayor que la tasa de infiltración) o bien puede acumularse en las hojas de las plantas u hoyos donde se evaporará. Dependiendo de la infiltración, otra parte puede llegar aún a evaporarse en la capa superficial del suelo, o llegar hasta las capas subterráneas. La cantidad de agua que llegue a cada uno de los diferentes destinos no sólo dependerá de la intensidad de la lluvia, sino también de las propiedades químicas y físicas del suelo tales como la textura del suelo, la profundidad, la materia orgánica y la actividad biológica (FAO, 2014).

Las tasas de infiltración son afectadas por la cantidad de agua presente en el suelo en el momento de la lluvia, la cual dependerá del momento de ocurrencia de la última tormenta de lluvia y de la permeabilidad del suelo, que también depende de la capacidad del suelo para retener el agua.

Los factores más importantes responsables de las bajas tasas de infiltración de la lluvia son: exposición de los suelos a los impactos de las gotas de agua de lluvia, compactación del suelo que produce el deterioro de los poros y baja permeabilidad del suelo.

El balance de agua del suelo es fundamental para muchos de los procesos que influyen en el crecimiento y la degradación de los recursos suelo y agua de la planta. La predicción de la distribución espacial del agua del suelo en pérdidas por evaporación y transpiración de los cultivos permite tomar decisiones informadas de producción como: determinar el área que puede regarse con un determinado volumen de agua disponible, elaborar calendarios teóricos de riego de cultivos, estimar los volúmenes de agua que sean necesarios para auxiliar a los cultivos en caso de que la lluvia sea insuficiente para su buen desarrollo, así como seleccionar los cultivos más adecuados en zonas de agricultura de temporal (Villaman *et al.*, 2001). En general, hacer un aprovechamiento eficiente del agua.

## Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchitez Permanente (PMP)

El contenido de agua del suelo a capacidad de campo y punto de marchitez se utilizan para calcular la profundidad del agua que debe ser aplicada por el riego y para determinar la disponibilidad de agua, que es un factor crucial en la evaluación de la idoneidad de un área de tierra para la producción de un cultivo (Givi *et al.*, 2004).

Se presentan dos tipos de poros en el suelo, los macroporos son aquellos con un tamaño mayor a 10 micras ( $\mu$ ) responsables principalmente de la aireación, y los microporos o poros capilares, usualmente llenos de agua ( $<10 \mu$ ). Los poros también se pueden describir de acuerdo a su función como se muestra en el Cuadro 1.

**Cuadro 1. Descripción y función de los poros del suelo**

Tamaño de poros (mm diámetro)	Descripción de los poros	Funciones de los poros
<0,0002	Residual	Retienen agua que las plantas no pueden usar
0,0002-0,05	Almacenamiento	Retienen agua que las plantas pueden usar
>0,05	Transmisión	Permite que el agua drene y que entre el aire
>0,1 a 0,3	Enraizamiento	Permite que las raíces de las plantas penetren libremente
0,5-3,5	Canal de lombrices	Permiten que el agua drene y que entre el aire
2.0-50	Nidos de hormigas y canales	Permiten que el agua drene y que entre el aire

Residual	Retienen agua que las plantas no pueden usar
Almacenamiento	Retienen agua que las plantas pueden usar
Transmisión	Permite que el agua drene y que entre el aire
Enraizamiento	Permite que las raíces de las plantas penetren libremente
Canal de lombrices	Permiten que el agua drene y que entre el aire
Nidos de hormigas y canales	Permiten que el agua drene y que entre el aire

Cuando con una lluvia abundante o un riego cuantioso, el agua llega a ocupar prácticamente en su totalidad los poros del suelo, se dice que el suelo está saturado. Si el estado de saturación se prolonga demasiado tiempo, las raíces de las plantas pueden terminar por asfixiarse por falta de oxígeno para respirar. En un suelo saturado, el agua tiende a desplazarse hacia el subsuelo por gravedad, en el proceso de drenaje. Al principio, el drenaje

es muy rápido pero a medida que los poros más grandes se vacían, el agua que va quedando en el suelo es la que ocupa los poros más pequeños, donde es fuertemente retenida. Se llega así a un momento en que el drenaje es tan lento que el contenido de agua en el suelo permanece prácticamente constante. Cuando se llega a ese punto, se dice que el suelo está a capacidad de campo. A capacidad de campo, los macroporos del suelo están llenos de aire, mientras que los poros capilares están repletos de agua. El tiempo que transcurre desde el estado de saturación hasta que alcanza la capacidad de campo varía con el tipo de suelo.

Buena parte del agua retenida en el suelo a capacidad de campo puede ser aprovechada por las plantas, pero a medida que las raíces la van extrayendo, el agua restante va quedando retenida cada vez con más fuerza, llegando a un punto tal, que la retención es tan fuerte que las plantas no pueden absorber el agua tan rápidamente como la pierden por transpiración, y se produce su marchitez. Ese momento, es el punto de marchitez permanente. Por debajo de ese contenido de humedad, las plantas ya no pueden extraer más agua del suelo. En el punto de marchitez permanente, el aire ocupa además de los macroporos, una parte importante de los microporos.

La diferencia entre la humedad del suelo a capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) representa la fracción de agua útil o disponible para las plantas (Casas, 2012).

En un estudio realizado por De la Cruz (1996), se muestra como la sequía afecta el rendimiento del amaranto cuando el suelo se encuentra a un 20% de humedad aprovechable. La utilización de 100% de humedad aprovechable puede ser descartada siendo factible manejar niveles por debajo del 60% de humedad aprovechable. Además presenta como la proporción vástago/raíz no se altera en las condiciones manejadas porque la raíz no es un factor de respuesta a la sequía en la colecta utilizada, lo que hace suponer a la raíz como eficiente en la absorción de agua que indica que es una evasora de la sequía.

## EL CULTIVO DE AMARANTO

### *Descripción*

En Coxcatlán, Puebla, cuna de la agricultura, se localizaron los primeros vestigios de semilla de *Amaranthus hypochondriacus* L. (5200 a 3400 años A.C.). El amaranto era uno de los alimentos más importantes en la época prehispánica (Setien y Velasco, 1999), los aztecas lo utilizaban en sus ceremonias religiosas hasta que fueron suprimidas por los conquistadores, logrando con eso una caída sustancial de la producción y disponibilidad (Rodas y Bressani, 2009). Fue hasta los años 80's que el cultivo tuvo una revalorización por la sociedad, al ser uno de los cereales más ricos en proteínas y minerales esenciales para el hombre (Moreno *et al.*, 2005). Actualmente la creciente demanda también tiene que ver con el interés de los consumidores de productos naturales de alto valor nutritivo, consumidores vegetarianos, interés de los agroindustriales y los requerimientos del mercado internacional (Mujica y Berti, 1997).

El amaranto es una planta perteneciente al género *Amaranthus* (familia Amaranaceae), es una planta herbácea que produce gran cantidad de grano comestible tipo cereal, tiene un metabolismo fotosintético tipo C4, con amplia diversidad genética, alta productividad, y se adapta a diferentes condiciones edafoclimáticas especialmente a suelos secos y altas temperaturas (Omami *et al.*, 2006).

El amaranto es una planta muy eficiente en la fijación de CO<sub>2</sub>. También se caracteriza por no presentar fotorespiración y un bajo empleo de agua para producir la misma cantidad de follaje que los cereales (Nieto, 1990). Por lo cual, el cultivo de amaranto ha sido una alternativa para zonas secas por su gran adaptabilidad a condiciones de temporal (Goldberg y Covas, 1988). El amaranto requiere áreas con precipitaciones de 400 a 600 mm/ciclo de cultivo, en caso de zonas más secas se requieren riegos suplementarios (Suquilanda, 1995; Díaz-Ortega *et al.*, 2004).

Algunas de las características agroclimáticas para esta planta fueron estudiadas determinándose parámetros de lluvia y temperatura (promedio de las condiciones de las regiones productoras de amaranto) que se muestran en el Cuadro 2 (Taboada y Guadarrama, 2007):

**Cuadro 2. Indicadores agroclimáticos y categorización del cultivo de *Amaranthus spp.***

<b>Precipitación (mm)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Clasificación</b>
<600	<14	Mala
600-800	14-16	Regular
800-1200	16-24	Buena
1200-1400	24-26	Regular
>1400	>26	Mala

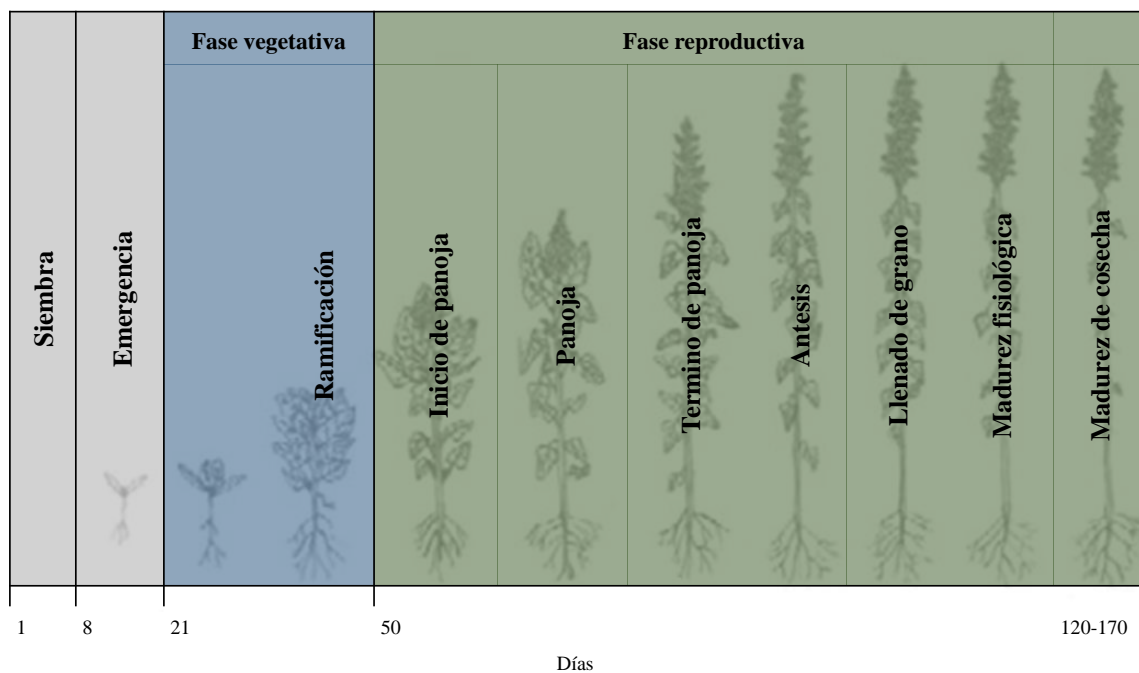
### *Etapas Vegetativas*

El periodo vegetativo del amaranto varía entre 120 a 170 días dependiendo de las condiciones ambientales en que se desarrolle, las épocas de siembra varían de acuerdo a las condiciones climáticas, comenzando en agosto hasta octubre (Figura 4).

Mora (2008) describe las etapas vegetativas del amaranto en los siguientes puntos:

1. Emergencia. Las plántulas emergen del suelo y muestran sus dos cotiledones extendidos, de 8 a 21 días.
2. Fase vegetativa. Existen diferentes subfases, determinándose de acuerdo al número de nudos en el tallo principal, donde las hojas se encuentren expandidas al menos 2 cm. En la subfase 4 la planta comienza a ramificarse, dura alrededor de 30 días.
3. Fase reproductiva:
  - 3.1. Inicio de panoja. Generalmente comienza entre 50 y 70 días después de la siembra.
  - 3.2. Panoja. Cuando la panoja tiene al menos 2 cm de largo.
  - 3.3. Terminación de panoja. Cuando la panoja tiene al menos 5 cm de largo.
  - 3.4. Antesis. Al menos una flor se encuentra abierta mostrando estambres separados y el estigma completamente visibles. Etapa de alta sensibilidad a heladas y estrés hídrico, la planta comienza a eliminar las hojas inferiores más viejas y de menor eficiencia fotosintética.

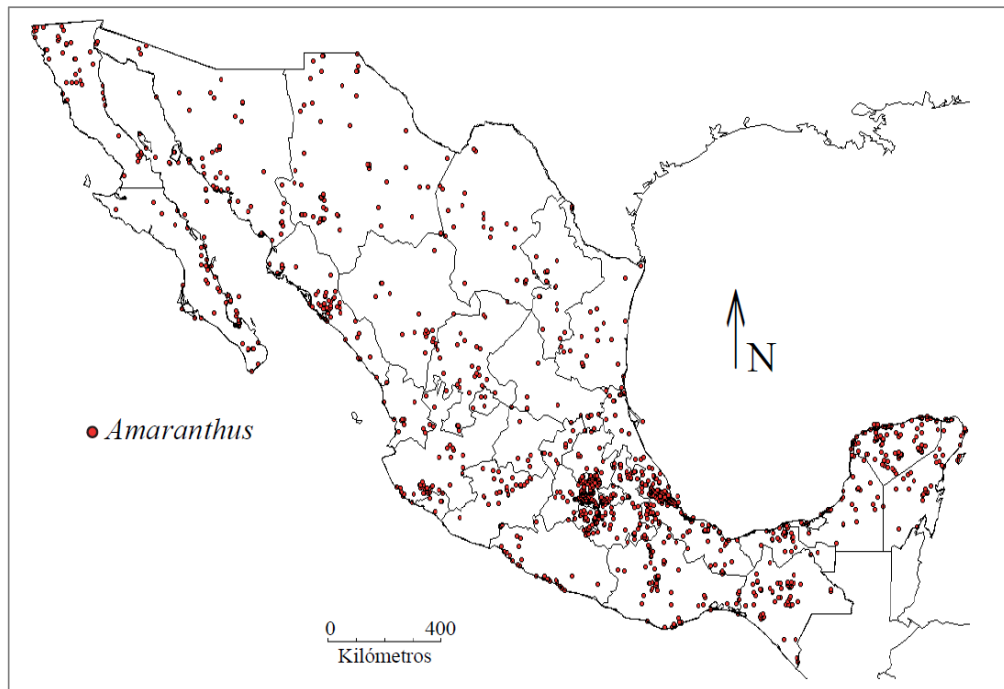
- 3.5. Llenado de grano. La antesis se ha completado en al menos un 95% del eje de la panoja.
- 3.6. Madurez fisiológica. No hay un criterio específico para determinarla, sin embargo, el cambio de color de la panoja es el más utilizado. Las semillas son duras y caen al sacudir la panoja.
- 3.7. Madurez de cosecha. Las hojas envejecen y caen, la planta presenta un aspecto seco de color café.



**Figura 4. Esquema de las etapas vegetativas del cultivo de amaranto**

### *Distribución*

El género *Amaranthus* se encuentra presente en todos los estados del país (Figura 5); las especies cultivadas *A. cruentus* y *A. hypochondriacus* se distribuyen en la parte centro sur de México; la especie silvestre *A. hybridus* se localiza prácticamente en todo México, mientras que *A. powelli* está ubicada del centro al norte de México.



**Figura 5. Distribución geográfica de la especie *Amaranthus* en México (Espitia-Rangel *et al.*, 2010)**

El amaranto crece en un amplio rango de altitud, desde el nivel del mar hasta los 3 000 metros sobre el nivel del mar (msnm), puede prosperar en un amplio rango de condiciones de suelos, con pH desde muy ácidos hasta muy alcalino, de textura arcillosa hasta arenosa (Duncan, 1981; Trinidad, 1986), siempre y cuando no presenten problemas de drenaje. Por lo anterior, el cultivo de amaranto cuenta con un potencial agronómico alto que puede ser una alternativa productiva para los agricultores que siembran en zonas de temporal, debido a que es un cultivo resistente a la sequía.

De acuerdo a datos del SIAP, en 2013 el cultivo de amaranto tuvo una producción de 4,617.73 toneladas anuales, con una superficie sembrada de 3,729.00 hectáreas siendo el 98% cultivos de temporal.

Los estados que producen amaranto son Puebla, Morelos, México, Tlaxcala y el Distrito Federal. Puebla es el principal productor nacional (2,143.40 t/año), sin embargo, el distrito de Tehuacán aporta apenas el 1.3%.

## *Usos*

El amaranto posee alrededor de 17% de proteína, un valor superior al de todos los cereales, por ejemplo, el trigo tiene entre 10 a 15%, mientras que el arroz de 5 a 8%. Las extraordinarias propiedades nutricionales y fisicoquímicas de la proteína del amaranto están bien documentadas (Barba de la Rosa *et al.*, 2009). Su importancia no radica en la cantidad sino en la calidad de la misma con un excelente balance de aminoácidos.

Según la FAO (Food and Agricultural Organization / Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) y la OMS (Organización Mundial de la Salud), sobre un valor proteico ideal de 100, el amaranto posee 75, la leche vacuna 72, la soja 68, el trigo 60 y el maíz 44. Cuando se realizan mezclas de harina de amaranto con harina de maíz, la combinación resulta excelente, llegando a índices cercanos del 100, porque el aminoácido que es deficiente en uno abunda en el otro. Además, la digestibilidad de su grano es del 93%. A su vez, el grano de amaranto no posee gluten, por lo que es un alimento apto para celíacos.

De la planta de amaranto, además del grano, se pueden aprovechar las hojas como vegetal o para producción de forraje, debido a la alta calidad de la materia seca.

## RETENEDORES DE HUMEDAD

Los retenedores de humedad son polímeros biodegradables que absorben y retienen grandes cantidades de agua y nutrientes cuando son introducidos en el suelo o en cualquier otro medio de cultivo. Los polímeros hidrofílicos son monómeros de alto peso molecular, los polímeros se diferencian entre ellos por un monómero específico que es capaz de retener un gran volumen de agua en relación a los gramos del material. El poliacrilato de potasio es uno de los principales polímeros utilizados con aplicación en la agricultura (Figura 6).

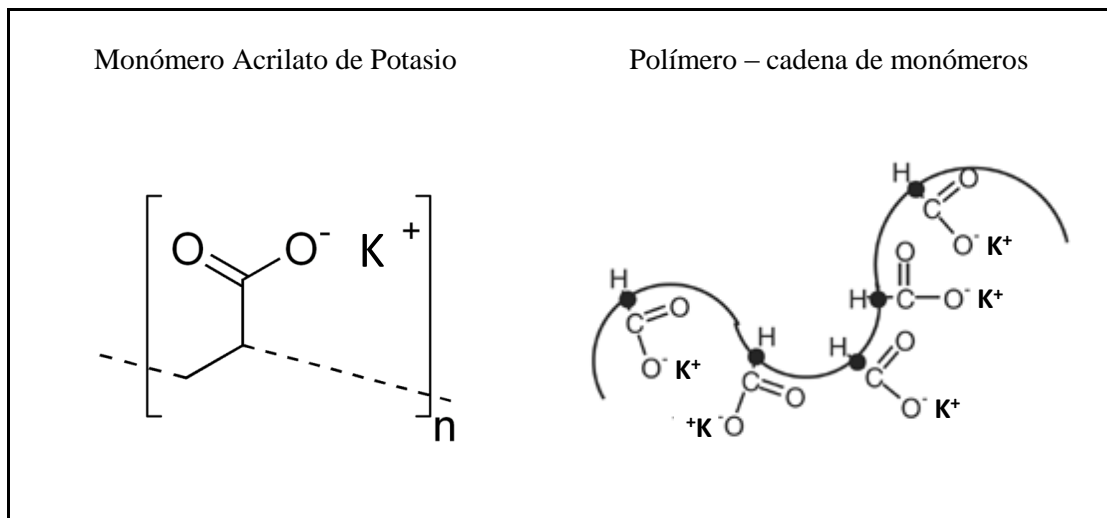


Figura 6. Estructura del Poliacrilato de Potasio

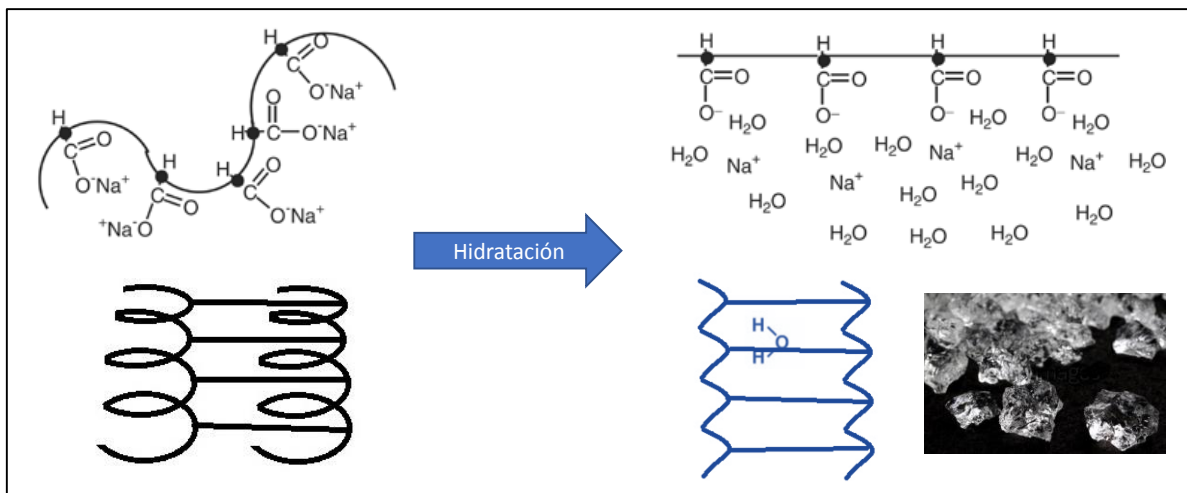
La capacidad de retención de agua de estos materiales permite el desarrollo de las plantas aún en épocas secas aprovechando al máximo los escasos recursos de agua y nutrientes disponibles, contribuyen con mejores producciones en condiciones adversas de sustrato o suelo (Rivera, 2007). Los polímeros al hidratarse forman una sustancia gelatinosa a la que llamamos hidrogel con un tiempo de vida entre 5 y 10 años dependiendo de las condiciones ambientales, del suelo y la planta. Algunas de las características de los hidrogeles son:

- Absorción de agua cientos de veces su peso
- Uso como único sustrato para el crecimiento de las raíces
- Reduce la presión por impactos
- Reduce el uso de pesticidas (herbicidas, fungicidas)

- Absorbe fertilizantes solubles y los libera paulatinamente
- Mejora el drenaje

La Figura 7 representa el proceso de absorción de agua de un poliacrilato súper absorbente. En estado seco, las cadenas del polímero se enrollan. Cuando sus moléculas son colocadas en contacto con el agua, el ion de sodio se separa de manera que los grupos carboxilo se cargan negativamente y repelen entre sí para desenrollar la cadena de polímero para permitir que más agua para asociar con más grupos carboxilo o átomos de sodio. A medida que el polímero sigue desenrollar y absorber el agua, se hincha en un material de tipo gel.

Las moléculas de agua se sujetan firmemente a los iones carboxilato de la red del polímero súper absorbente por enlaces por puente de hidrógeno.



**Figura 7. Hidratación del hidrogel**

Su impacto sobre el suelo incluye: retención y disponibilidad de agua, infiltración, aireación, friabilidad, floculación, permeabilidad, reducción de la compactación, número y tamaño de agregaciones, tensión del suelo por el agua disponible, prácticas de manejo de agua. De este forma mejora las condiciones para las plantas: abastecimiento de los nutrientes, nitrificación del suelo, reducción de clorosis por falta de hierro, reducción de los costos de producción, contenido bacteriano y de microflora del suelo, absorción osmótica de nutrientes y de agua por las plantas, reducción del estrés durante el trasplante, incremento del rendimiento, aumento de sobrevivencia (CIM, 2009).

La aplicación de los hidrogeles está específicamente diseñado para la aplicación en el campo:

- En la agricultura se puede emplear para hortalizas, cítricos, fruticultura, cultivos en surcos.
- En el sector forestal se utiliza en viveros, transporte y protección, trasplantes.
- En lo ornamental.
- En paisajismo, restauración, mejora de campos de golf, revegetación de áreas de minería (Plaza, 2006).

El poliacrilato de potasio es insoluble en agua, no tóxico y biodegradable. Los agricultores mexicanos han estado utilizando durante 12 años y no se han observado efectos a largo plazo. La Administración de Medicamentos y Alimentos (FDA, por sus siglas en inglés) ha aprobado su uso en los Estados Unidos.

## MATERIALES ORGÁNICOS

En el caso de la agricultura de temporal, el agua es el factor más necesario y limitante para el crecimiento y producción de los cultivos, dependiendo en primer lugar de la duración del periodo efectivo de lluvias, y de la disponibilidad de agua en el suelo (Flores y Ruíz, 1998).

La capacidad de almacenaje de agua en el suelo es determinada por la profundidad efectiva de raíces y las propiedades de retención de agua del suelo.

Actualmente, cada vez es más común la aplicación de materiales orgánicos (estiércol, composta, abonos verdes y residuos de cosecha) a fin de mejorar sus condiciones de fertilidad de suelo, aumentar la disponibilidad de nutrimentos para las plantas, así como la capacidad de retención de agua (López *et al.*, 2001; Forero *et al.*, 2010; Arrieche y Mora, 2005; Radillo *et al.*, 2013a). En las regiones semiáridas donde hay bajo aporte de materia orgánica, es esencial para el mantenimiento de la productividad de los suelos (Barzegar, 2002).

Los abonos orgánicos (estiércol, composta y residuos de cosecha) se han recomendado en tierras sometidas a cultivo intenso para mejorar la estructura del suelo; con ello, se aumentan

la capacidad de retención de agua y la disponibilidad de nutrientes para las plantas (López *et al.*, 2001). El uso de abonos orgánicos es ya una alternativa al sistema de producción de maíz para aumentar los contenidos de materia orgánica en los suelos, a fin de mejorar sus condiciones de fertilidad, capacidad de retención de agua y nutrientes (Radillo *et al.*, 2013a). De hecho, es una alternativa para cualquier cultivo.

El uso de acolchados orgánicos; consiste en aprovechar subproductos agrícolas regionales que son fácilmente de conseguir, los cuales se degradan e incorporan al suelo después de cumplir su objetivo, minimizando el problema de residuos sólidos, contaminación potencial del suelo; además, aportan materia orgánica. (Radillo *et al.*, 2013b). Los residuos vegetales utilizados como acolchados orgánicos ayudan a conservar la humedad en el suelo al reducir la pérdida de agua por evaporación, mantener una temperatura uniforme en el suelo y caliente durante el clima frío, minimiza la erosión, reduce la compactación por lluvias y la presencia de maleza.

González *et al.* (2013) obtuvieron resultados de humedad en el suelo positivos con la aplicación de estiércol bovino a 71 días después de la siembra de maíz forrajero con un tratamiento de 60 t ha<sup>-1</sup> de estiércol (65% de humedad), superando significativamente al químico (58.29%) y al testigo (53.76%).

Por su parte, Castellanos *et al.* (1996) observó que el contenido de humedad aumenta debido a prácticas de aplicación de abonos orgánicos; esto lo atribuye a que disminuye la densidad aparente, se incrementa la porosidad y se modifica la estructura al mejorar la formación de agregados.

López *et al.* (2001) encontraron que la aplicación de 40 t ha<sup>-1</sup> y 60 t ha<sup>-1</sup> de estiércol bovino fue el que mejor retuvo y conservó la humedad a través del tiempo; resultados similares fueron reportados por Salazar *et al.* (2009).

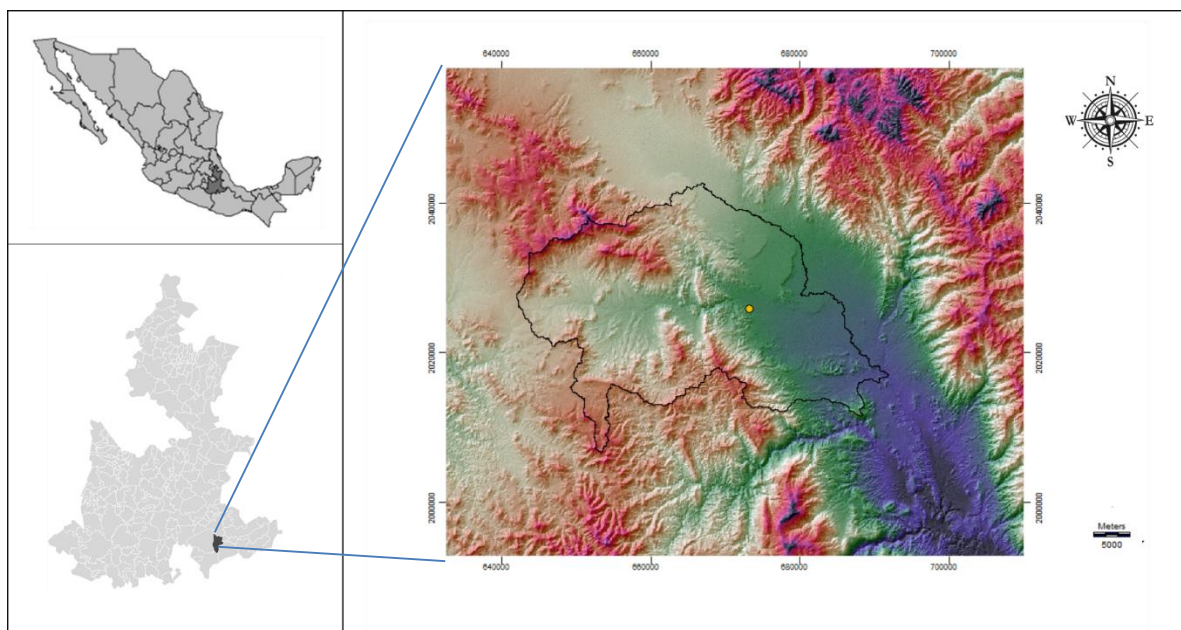
Un estudio realizado en México con chile (*Capsicum annuum* L.) utilizando como tratamientos tres dosis de composta concluye que a mayor cantidad de composta, menor evapotranspiración, lo que concuerda con la mayor capacidad de retención de humedad con los diferentes tratamientos (Nieto *et al.*, 2002).

Para realizar una agricultura sustentable se requiere conservar, mejorar y hacer un uso eficiente de los recursos naturales a través del manejo integrado del suelo, el agua y recursos biológicos disponibles. El uso adecuado de los materiales orgánicos es una alternativa sostenible para satisfacer los requerimientos hídricos requeridos por las plantas.

# METODOLOGÍA

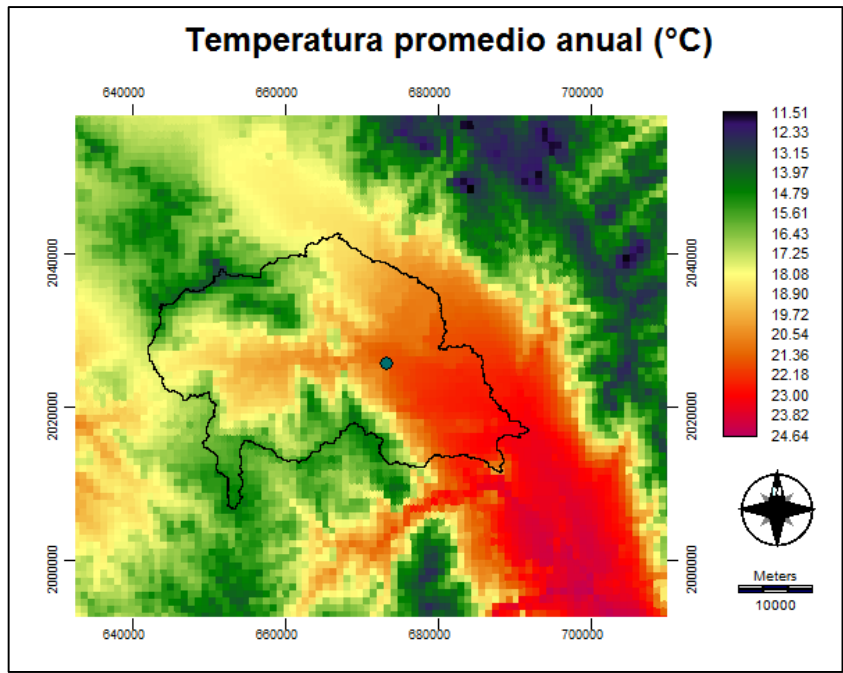
## DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

El experimento se desarrolló en una parcela experimental dentro del Museo del Agua, el cual está ubicado en el municipio de San Gabriel Chilac al sureste del estado de Puebla, dentro del valle de Tehuacán, en la Figura 8 se observa su ubicación así como la delimitación de la cuenca a la que pertenece. Sus coordenadas geográficas son  $18^{\circ}19'34''\text{N}$  y  $97^{\circ}20'53''\text{O}$  y sus colindancias son al norte con Tehuacán, al sur con San José Miahuatlán, al este con Altepexi y al oeste con Zapotitlán Salinas.



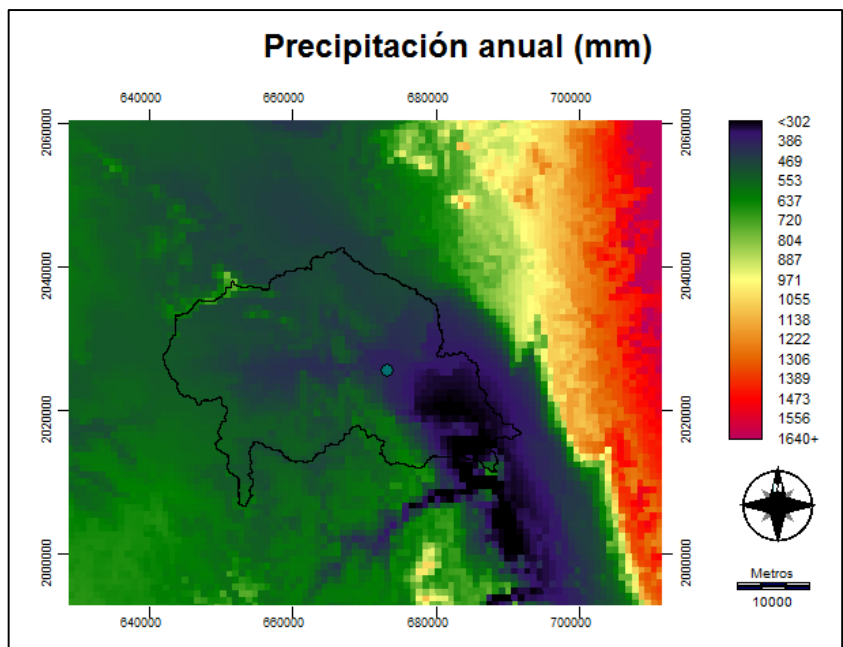
**Figura 8. Ubicación del área de estudio**

La altitud del área de estudio es de 2116.8 msnm. El clima es semiárido seco, con una temperatura promedio anual de  $21.7^{\circ}\text{C}$ , los suelos predominantes son: Leptosol (60%), Regosol (17%) y Vertisol (14%). Actualmente, la zona urbana está creciendo sobre suelo aluvial del Cuaternario, sobre terrenos previamente ocupados por agricultura.



**Figura 9. Modelo de la temperatura en la cuenca de la zona de estudio**

La precipitación media anual en la zona del valle es de tan solo de 385 mm y la evaporación de 831 z, por lo que la mayor parte del agua se evapora y el escurrimiento e infiltración son reducidos (CONAGUA, 2013).



**Figura 10. Modelo de la Precipitación anual en la cuenca de la zona de estudio**

En el municipio se produce maíz, hortalizas, jitomate, tomate verde, ajo, calabacitas, forraje y alfalfa; donde se considera que el 80% del suelo no es apto para la agricultura (INEGI, 2009).

## DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El experimento se basó en la evaluación de varios materiales orgánicos, sobre todo de aquellos que habitualmente usan los productores de la región en el área de estudio; así como un gel retenedor de humedad para conocer su efecto en la conservación de humedad en suelo.

Se montó un experimento en campo, en donde se aplicaron diferentes tratamientos de materiales orgánicos solos y mezclados con un hidrogel, teniendo un tratamiento testigo de suelo solo.

A partir de los 50 días después del trasplante, los tratamientos fueron sometidos a periodos escalonados de sequía, a fin de detectar la capacidad de retención de humedad en el suelo y el grado de afectación sobre el crecimiento y desarrollo de las planta.

## DISEÑO EXPERIMENTAL

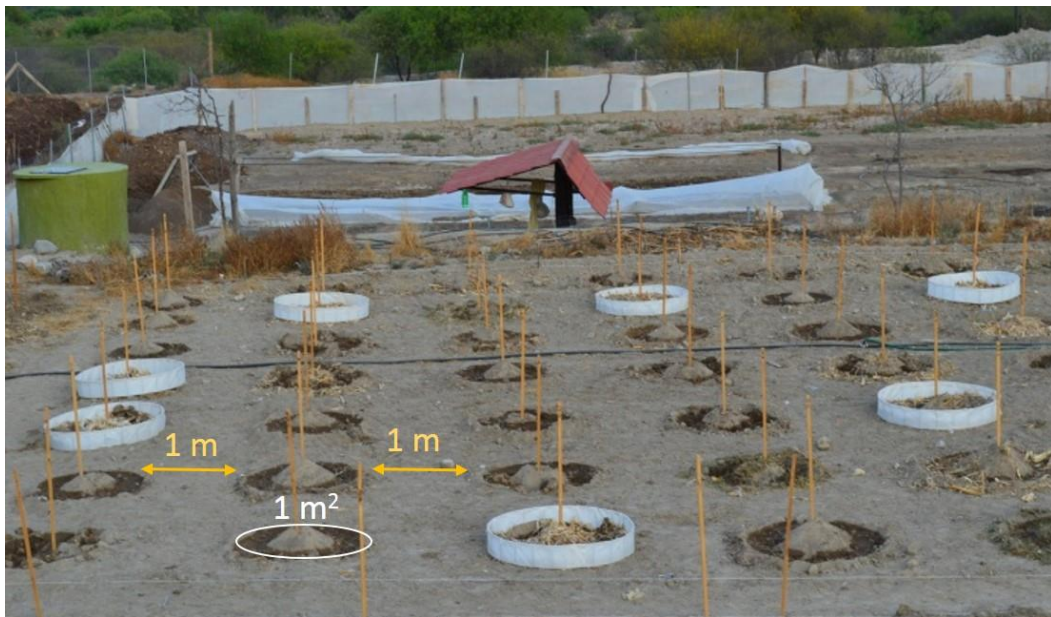
Se delimitaron las unidades experimentales, siendo una unidad experimental un círculo de 1 m<sup>2</sup>, con una distancia de 1 m de separación entre ellas, a fin de no permitir interferencia de humedad (Figura 11).

El 20 de febrero de 2014, se sembró semilla de amaranto criolla, obtenida de los productores de la región, en un vivero adjunto a la parcela experimental.

El trasplante se realizó el 6 de marzo, ubicando 3 plantas por mata en suelo húmedo, con 5 matas por unidad experimental, manteniendo un riego constante durante el primer mes para asegurar su éxito. El riego constante consistía en aplicar 2 cm de lámina de agua cada tercer día. Se realizó un aclareo a fin de que se mantuviera una cantidad de 5 plantas por unidad experimental.

Los materiales orgánicos fueron mezclados con el suelo de la parcela en los primeros 10 cm de profundidad, una semana antes del trasplante. El gel tuvo una aplicación directa al momento del trasplante en campo, después de haberse hidratado completamente 2 días antes (2 g/planta).

La aplicación de las enmiendas orgánicas fue a razón de  $4.5 \text{ Kg m}^{-2}$ , tomando como referencia las recomendaciones de Huerta *et al.* (2005), quienes utilizaron *Mucuna pruriens* para lograr un medio en donde las lombrices de tierra encuentran condiciones ideales para vivir.



**Figura 11. Unidades experimentales en la parcela**

Los tratamientos fueron ubicados bajo un arreglo bifactorial: donde el factor A es la aplicación de un hidrogel, y el factor B es la incorporación de diferentes materiales orgánicos, dando un total de 14 tratamientos (Cuadro 3).

**Cuadro 3. Tratamientos evaluados, de los cuales se busca el mejor efecto de retención de humedad en el suelo.**

<b>Clave</b>	<b>Tratamiento</b>
<b>C</b>	Composta de estiércol de caprino ( <i>Capra aegagrus hircus</i> ) con restos de vegetales
<b>RM</b>	Residuos de cosecha de maíz ( <i>Zea mays</i> )
<b>RA</b>	Residuos de cosecha de amaranto ( <i>Amaranthus hypochondriacus</i> )
<b>AO</b>	Residuos de cosecha de maíz en forma de acolchado orgánico
<b>E</b>	Estiércol de caprino
<b>AV</b>	Alfalfa ( <i>Medicago sativa</i> ) cortada como abono verde
<b>S</b>	Suelo sin ninguna aplicación
<b>R-C</b>	Hidrogel + Composta de estiércol de caprino con restos de vegetales
<b>R-RM</b>	Hidrogel + Residuos de cosecha de maíz
<b>R-RA</b>	Hidrogel + Residuos de cosecha de amaranto
<b>R-AO</b>	Hidrogel + Residuos de cosecha de maíz en forma de acolchado orgánico
<b>R-E</b>	Hidrogel + Estiércol de caprino
<b>R-AV</b>	Hidrogel + Alfalfa cortada como abono verde
<b>R</b>	Hidrogel aplicado directamente al suelo como retenedor de humedad

El experimento corresponde a 14 tratamientos con 10 repeticiones dando un total de 140 unidades experimentales, bajo un arreglo completamente al azar, distribuidas en campo como en la Figura 12.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10										
1	R-C	S-E	R-RA	S-RM	R-RA	R	R-RM	S-AV	R-AO	S-AO	R-E	S-AV	S-C	S-E	R-AV	S-E	S-RM	R-AV	T	S-E
2	R-RM	S-RA	S-AO	R-AV	R-AO	S-C	R-AO	R-RA	R-RM	R-E	S-C	R-AV	R-RA	S-AV	S-AO	S-RA	T	R	S-C	S-RA
3	S-AV	T	R-E	S-RA	S-RA	T	S-AO	S-RA	S-E	S-RA	T	R-RA	T	R-RM	R-E	R-RM	R-RA	R-C	S-AO	S-RM
4	S-RM	S-AO	R-RM	S-C	R-C	R-RM	T	S-C	S-RM	R	R-C	R-AO	S-RM	R	S-RM	R-C	R-RM	R-E	R-AV	R-RM
5	R-E	R-AO	T	R-C	R-E	S-AO	S-E	R-E	S-C	R-C	R	S-RM	R-AO	R-E	R-AO	T	S-AO	R-AO	R-C	R-E
6	R-RA	S-C	E	R	R-AV	S-RM	S-RM	R-C	R-RA	T	S-AO	S-RA	S-AO	R-AV	R	S-C	S-RA	S-E	R-AO	S-AV
7	R-AV	R	S-AV	R-AO	S-E	S-AV	R-AV	R	R-AV	S-AV	R-RM	S-E	S-RA	R-C	S-AV	R-RA	S-C	S-AV	R-RA	R

**Figura 12. Distribución de los tratamientos en las unidades experimentales en campo.**

El 14 de abril, 2 horas después de un riego a capacidad de campo, se tomaron muestras de suelo para estimar los contenidos de humedad en laboratorio, mediante el método gravimétrico, secando el suelo en estufa de secado a 105°C, hasta peso constante, utilizando la fórmula:

$$\% \text{ de humedad} = ((\text{Peso húmedo de suelo} - \text{Peso seco del suelo}) / \text{Peso seco del suelo}) \times 100.$$

A los 54 días después de la siembra, se seleccionaron dos repeticiones de cada tratamiento para continuar con las aplicaciones de riego ininterrumpidamente como se venía realizando; a los 5 días se les renovó el riego a otras 2 repeticiones; a los 10 días se les renovó a otros 2 repeticiones; y a los 15 días, a otros dos.

A los 5 días, antes de renovar el riego a las siguientes 2 repeticiones, se tomó otra muestra de suelo para determinar la pérdida de humedad después de 5 días de un riego normal. Este procedimiento se repitió a los 10 y a los 15 días, con las repeticiones seleccionadas para su renovación de riego, respectivamente. La toma de muestras de suelo fue a una profundidad entre 5 y 10 cm, abarcando el periodo entre el 14 y el 30 de abril de 2014.

A los 94 días se tomaron datos sobre el número de plantas sobrevivientes por unidad experimental, la altura de cada una de ellas y el diámetro de tallo. La variable altura de la planta se midió desde la base del tallo (cerca de la superficie del suelo) hasta su ápice con un flexómetro metálico. En cuanto a la variable diámetro de tallo, se utilizó un vernier con mediciones del tallo a 3 cm de altura del suelo.

A la mitad del periodo de sequía inducida a las plantas se realizó un monitoreo de la temperatura ambiental (termómetro ambiental de máximas y mínimas), temperatura del suelo mediante un termómetro Traceable Control Company (-50°C – +30°C), humedad relativa (Higrómetro Traceable™ Rotate Stock), y radiación solar con un Luxómetro HANNA HI 97500 (0.001-199.9 Klx) durante 24 horas a la mitad del desarrollo del cultivo.

Además, se obtuvieron muestras de suelo a profundidades de 5-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm para cada tratamiento para la determinación de contenido de humedad.

Al término de la cosecha, se estimó la materia seca de la parte aérea de las plantas mediante el método gravimétrico: se llevaron al laboratorio las plantas de tres unidades experimentales por tratamiento en bolsas de papel para el cálculo de materia seca total, utilizando estufa de secado a 70°C hasta peso constante para poder aplicar la siguiente fórmula:

$$\% \text{ materia seca} = (\text{Peso de la muestra después de la desecación} / \text{Peso de la muestra antes de la desecación}) * 100$$

Finalmente, la panoja fue separada del resto de la planta para pasarse por tamiz y separar las semillas de los residuos vegetales, quedando el grano limpio con ayuda de una secadora. Al término de estas labores se procedió a pesar la semilla.

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO

De los datos de % de humedad del suelo del periodo de sequía inducida, tomados a 0, 5, 10 y 15 días, a través de una regresión lineal se les estimó el modelo de la pendiente de pérdida de humedad en el tiempo, ajustados al tipo binomial, para reconstruir el comportamiento de las curvas de retención de humedad de cada tratamiento en campo.

Los datos obtenidos se analizaron mediante análisis de varianza (ANOVA) de dos vías, previa prueba de cumplimiento de supuestos. Las variables de respuesta, tanto de desarrollo de la planta, humedad del suelo y materia seca de cada tratamiento fueron correlacionados con las variables ambientales. Para el análisis se utilizó el paquete estadístico Statgraphics Centurion XVI.I. Se realizó una prueba múltiple de medias (Tukey,  $p < .05$ ) para conocer el mejor tratamiento. Además de pruebas de correlación.

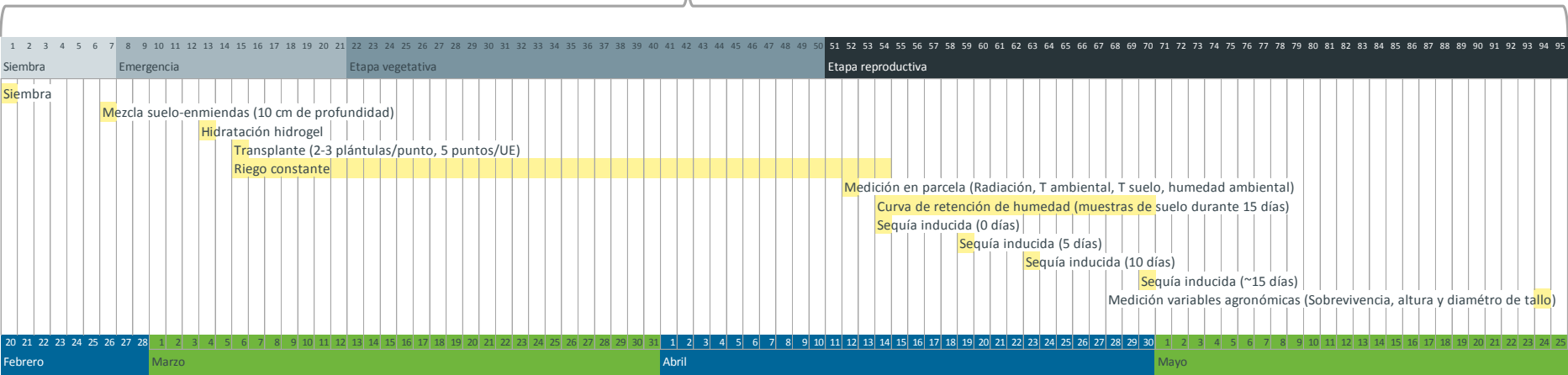
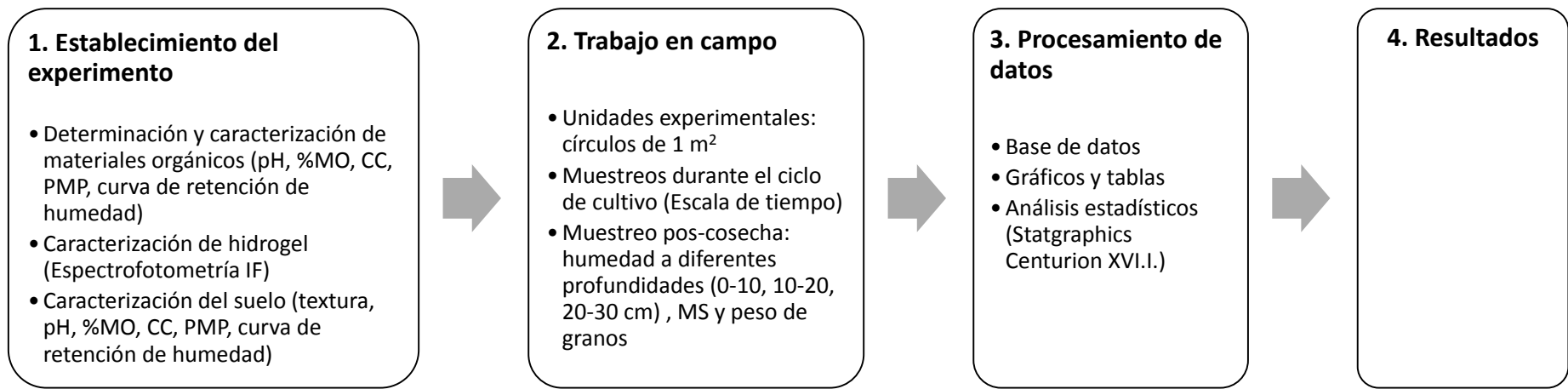


Figura 13. Esquema metodológico de la investigación

# RESULTADOS

## CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

La caracterización del suelo se muestra en el Cuadro 4, a partir de los resultados en porcentaje de arena, limo y arcilla se clasifica como un suelo con clase textural franca, así como con una humedad aprovechable de 10.9, esto a partir de las determinaciones de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP).

**Cuadro 4. Caracterización fisicoquímica del suelo**

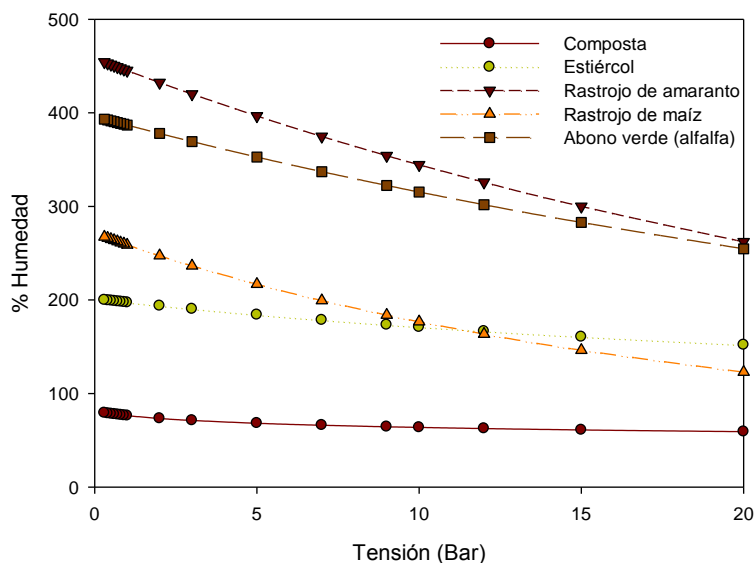
Variable	Unidad	Valor
pH		7.8
Materia orgánica (MO)	%	4.9
Capacidad de campo (CC)	% humedad	36.6
Punto de marchitez permanente (PMP)	% humedad	25.7
Densidad aparente	g cm <sup>-3</sup>	1.08
Arena	%	38.7
Limo	%	41.8
Arcilla	%	19.5

Los materiales orgánicos utilizados fueron: residuos de maíz, residuos de amaranto, abono verde (alfalfa), estiércol, acolchado orgánico, y composta producida en la zona. La caracterización de los materiales orgánicos se muestra en el siguiente cuadro:

**Cuadro 5. Resultados de la caracterización de los materiales orgánicos**

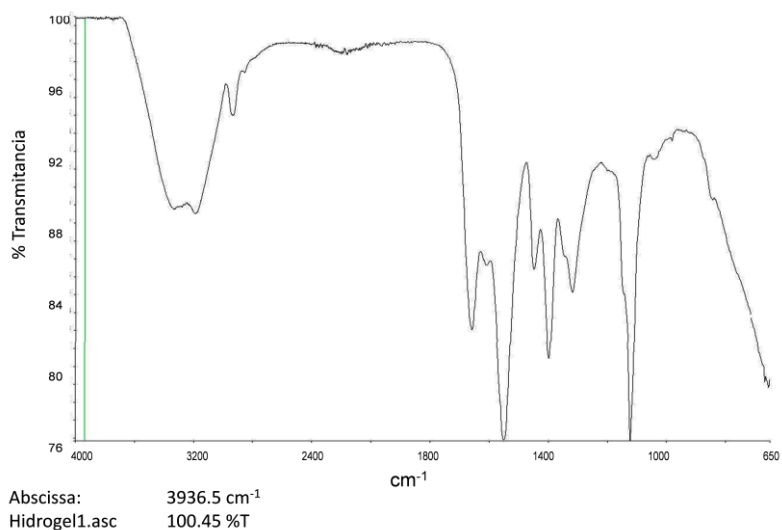
Enmienda orgánica	pH	MO %	CC %	PMP %	HA %
Composta	7.87	43.4	79.2	61.1	18.1
Estiércol	8.38	65.3	199.9	160.5	39.4
Residuos de amaranto	6.25	86.7	454.3	300.0	154.3
Residuos de maíz	4.8	92.8	267.3	146.3	121
Alfalfa (abono verde)	7.37	83	393.3	282.9	110.4

Las capacidades de retención de humedad de los diferentes materiales orgánicos utilizados en campo, fueron estimados en el laboratorio Física de suelos del Colegio de Posgraduados, campus Montecillos, las cuales se muestran en la Figura 14.



**Figura 14. Curva de retención de humedad de los materiales orgánicos**

El hidrogel se empleó en forma de gel ‘silos de agua’, constituido por poliacrilato de potasio, cuya estructura molecular permite la absorción y retención de hasta 100 veces su peso en agua. Se identificó acrilato de potasio en la composición del retenedor hídrico utilizado, a partir de la caracterización por Espectroscopia FTIR el cual se presenta muy similar al espectro del poliacrilato de potasio comercial en polvo, que registran Xiaoming *et al.* (2004). (Figura 15).



**Figura 15. Espectro infrarrojo transformada de Fourier (IRTF) del gel retenedor**

## RETENCIÓN DE HUMEDAD DE LOS TRATAMIENTOS EN SEQUÍA INDUCIDA

El historial de la capacidad de retención de la humedad en el suelo de los tratamientos evaluados, a lo largo de los 15 días que duró la sequía inducida, se muestra en el Cuadro 6, en donde se distingue que la humedad a una profundidad de entre 5 y 10 cm, todos los tratamientos respondieron de manera similar ( $F(6, 616)=0.6, p=0.8$ ).

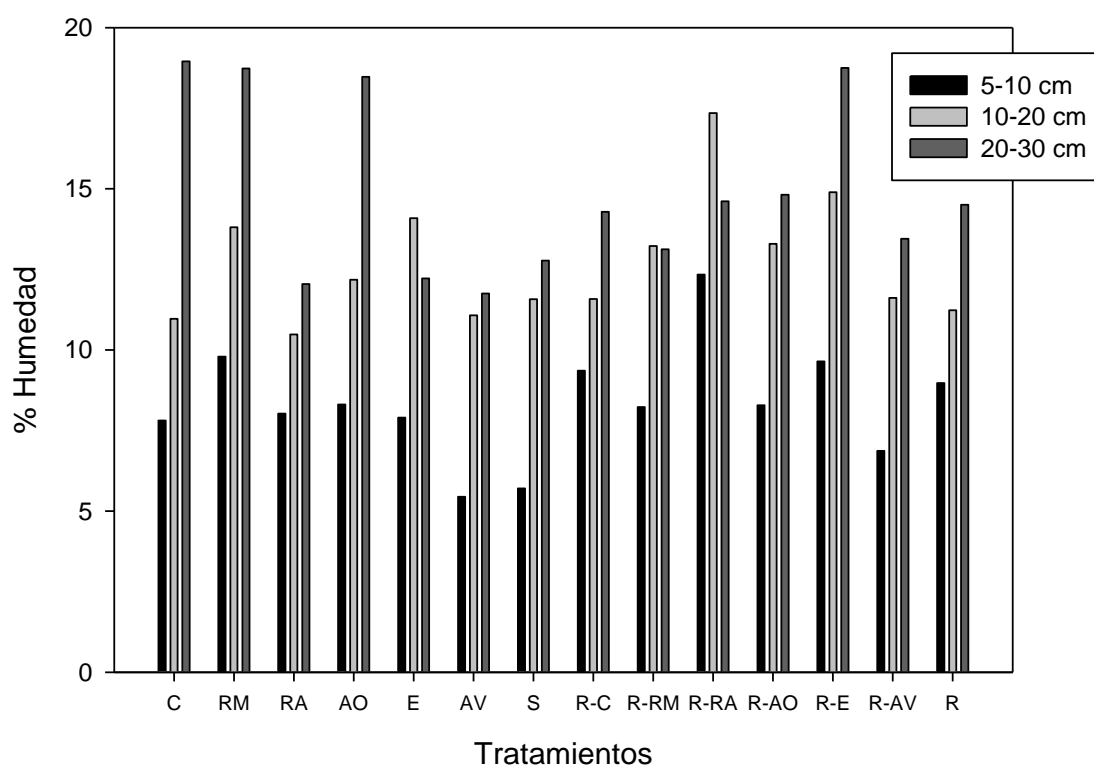
**Cuadro 6. Contenido de humedad en suelo por tratamiento respecto al periodo de sequía inducida**

% HUMEDAD EN SUELO														
Día	C	RM	RA	AO	E	AV	S	R-C	R-RM	R-RA	R-AO	R-E	R-AV	R
1	37.2	39.2	40.5	39.1	36.5	43.8	41.1	39.6	33.8	38.2	39.1	39.4	36	38.6
2	23.4	28.3	25.3	26.4	25	25.1	25.1	25.2	23.2	25.2	26	23.9	26	23.5
3	15.7	24.2	19.4	20.8	18.3	14.8	17.3	16.8	17.9	18.6	20.1	14.8	18.7	15.2
4	15.8	20.4	16.2	15.7	20.8	16.1	15.2	20	16.6	17.2	19.8	14.7	19.8	15.7
5	13.3	17.5	15.7	19.2	15.5	15.5	18.5	15.2	13.6	16.4	14.7	17.9	18.1	13.3
6	11.9	13.6	13.5	14.3	13.1	12.1	12.9	13	12.3	12.6	14.9	12.6	14.9	11.9
7	10.8	12.2	12.3	13.1	11.9	10.9	11.7	11.8	11.3	11.4	13.1	11.5	13.7	10.8
8	11.3	9.1	9.4	11.6	8.4	10	8.3	8.7	10.7	9	11.9	9.9	13.8	11.2
9	9.2	10.3	10.7	11.4	10.3	9.3	10.1	10.1	9.8	9.8	12.2	9.9	12.1	9.3
10	8.7	9.6	10.1	10.7	9.6	8.6	9.5	9.5	9.2	9.1	11.5	9.3	11.5	8.7
11	8.2	9	9.5	10.1	9.1	8.1	8.9	9	8.7	8.6	11	8.8	10.9	8.2
12	7.7	8.5	9.1	9.7	8.7	7.6	8.5	8.5	8.5	8.1	10.5	8.4	10.4	7.7
13	7.4	8.1	8.6	9.2	8.3	7.3	8.1	8.1	7.9	7.7	10.1	8	10	7.4
14	7	7.7	8.3	8.9	7.9	6.9	7.7	7.8	7.6	7.4	9.7	7.7	9.7	7
15	6.3	7.1	9.4	8.4	8.2	6.8	8.6	8.3	7	7.2	10.4	7.7	8.3	6.6
$\Delta H$	30.9	32.1	31.1	30.7	28.3	37.1	32.5	31.3	26.8	31	28.6	31.7	27.7	32.1

El porcentaje de humedad en el suelo disminuyó considerablemente durante los primeros 3 días para después estabilizarse, cuya curva de disminución de la humedad en el suelo responde a una pendiente general de  $y = 0.3911x^{-0.532}$ .

En la Figura 16 se presentan los contenidos de humedad al final del período de sequía inducida, a diferentes profundidades de 5-10, 10-20 y 20-30 cm, de acuerdo con el tratamiento aplicado. El tratamiento que tuvo el mayor porcentaje de humedad a una profundidad de 5-10 cm, corresponde al tratamiento de rastrojo de amaranto (RA) seguido de la combinación de rastrojo de amaranto con hidrogel (R-RA). A la profundidad de 10-20

cm los tratamientos con mayor humedad fueron el rastrojo de amaranto con hidrogel (R-RA) y el estiércol con hidrogel (R-E). Por otro lado, a una profundidad de 20-30 cm la composta (C), el rastrojo de maíz (RM), el rastrojo de maíz como acolchado orgánico (AO), y la mezcla de estiércol con hidrogel (R-E) tuvieron los mayores valores.



**Figura 16. Variación del contenido de humedad a diferentes profundidades**

### EFFECTOS DE LOS TRATAMIENTOS SOBRE EL DESARROLLO VEGETATIVO

Las medias de las variables agronómicas evaluadas se muestran en el Cuadro 7. El uso del hidrogel mostró efectos estadísticamente significativos ( $F(6, 66) = 3.2, p < 0.0$ ) en la sobrevivencia de las plantas, registrándose mayor número de plantas en los tratamientos a los que se les aplicó el hidrogel; sin embargo la aplicación de hidrogel al suelo no presentó efectos significativos en las variables de diámetro de tallo y altura de las plantas.

**Cuadro 7. Efectos de los tratamientos sobre las variables: número de plantas sobrevivientes, altura de las plantas y diámetro de tallo.**

Factor	Número de plantas sobrevivientes		Diámetro del tallo (cm)		Altura de la planta (cm)	
<i>Retenedor</i>						
Sin hidrogel	6.4 ±0.1	a	n.s.		n.s.	
Con hidrogel	6.7 ±0.1	b	n.s.		n.s.	
<i>Enmienda orgánica</i>						
C	6.3 ±0.2	ab	19.4 ±0.7	abc	61.7 ±2.5	ab
RM	6.7 ±0.2	b	22.3 ±0.7	cd	69.2 ±2.5	bc
RA	7.9 ±0.2	c	20.0 ±0.7	abc	62.0 ±2.5	ab
AO	6.6 ±0.2	b	23.0 ±0.7	d	73.1 ±2.5	c
E	5.7 ±0.2	a	19.0 ±0.7	ab	61.2 ±2.5	ab
AV	6.8 ±0.2	b	22.0 ±0.7	bcd	66.9 ±2.5	abc
S	6.3 ±0.2	ab	18.9 ±0.7	a	58.6 ±2.5	a
<i>Sequía inducida</i>						
0 días	6.9 ±0.2	b	22.7 ±0.6	c	70.9 ±2.0	b
5 días	6.6 ±0.2	ab	21.4 ±0.6	bc	71.5 ±2.0	b
10 días	6.6 ±0.1	ab	19.8 ±0.6	ab	60.9 ±1.9	a
15 días	6.3 ±0.1	a	18.6 ±0.4	a	55.5 ±1.5	a

Las medias con la misma letra, no tienen diferencias estadísticamente significativas. Prueba de Tukey,  $\alpha=0.05$ . n.s.= no hay diferencias significativas.

Se encontraron diferencias en las variables: número de plantas por tratamiento en cada unidad experimental ( $F(18, 66) = 5.0, p < 0.0$ ), altura de las plantas ( $F(18, 66) = 4.1, p < 0.0$ ) y diámetro del tallo ( $F(18, 66) = 2.15, p < 0.0$ ) respecto al tipo de material orgánico utilizado. En el caso del número de plantas, el rastrojo de amaranto tuvo un mayor número de plantas por unidad experimental. Mientras que los tratamientos con acolchado orgánico, abono verde (alfalfa) y el rastrojo de maíz, tuvieron buenos resultados en el diámetro de tallo y altura de las plantas.

El riego tiene un importante efecto en estos parámetros, se puede observar que a mayor tiempo de sequía disminuye el crecimiento y desarrollo de las plantas de amaranto. El no aplicar riego en 5 días se afecta un 6% en el crecimiento del tallo; en 10 días, 13% y en 15 días, 18%, respectivamente. Mientras que en la altura de la planta de amaranto, una sequía de 5 días no afecta; pero sí a los 10 días (14%) y aún más a los 15 días (22%). Es importante

mencionar que en campo, varias plantas que fueron sometidas al periodo de 15 días de sequía, nunca volvieron a recuperarse, a una condición de desarrollo vegetativo aceptable para su cosecha de hojas.

## MATERIA SECA Y PRODUCCIÓN DE GRANO

Los materiales orgánicos utilizados en los tratamientos muestran efectos sobre la materia seca total ( $F(7, 49)=4.3, p=0.0$ ). En el Cuadro 8, se puede observar como el tratamiento con rastrojo de maíz (RM) es el que produjo mayor contenido de materia seca; en cambio los tratamientos con composta (C), estiércol (E) y el suelo con retenedor (R) y suelo solo (S) tuvieron los menores rendimientos de materia seca total. Puede considerarse que un tratamiento no sufre estrés hídrico cuando la cantidad de materia seca producida sería de  $1,0 \pm 0,07 \text{ kg m}^{-2}$ , mientras que las plantas que se les niega el riego durante 15 días produjeron una media de  $0,6 \pm 0.07 \text{ kg m}^{-2}$ .

**Cuadro 8. Materia seca total de acuerdo al tratamiento evaluado**

<i>Factor</i>	<i>Materia seca total</i>	
<b>Retenedor</b>		
Sin Hidrogel	n.s.	
Con hidrogel	n.s.	
<b>Enmienda orgánica</b>		
C	$0.6 \pm 0.1$	bc
RM	$1.3 \pm 0.1$	a
RA	$1.0 \pm 0.1$	abc
AO	$0.9 \pm 0.1$	abc
E	$0.6 \pm 0.1$	bc
AV	$1.0 \pm 0.1$	bc
T	$0.5 \pm 0.1$	c
<b>Sequía inducida</b>		
0 días	$1.0 \pm 0.07$	a
5 días	$0.9 \pm 0.07$	ab
10 días	$0.8 \pm 0.07$	ab
15 días	$0.6 \pm 0.07$	b

El análisis de varianza sobre los datos de rendimiento en grano no mostró diferencias significativas entre los tratamientos ( $F(7, 48)=1.6, p=0.2$ ), por lo que se trató de observar el

comportamiento de los rendimientos de grano, entre los tratamientos que contenían retenedor y los que no, junto con el comportamiento de rendimientos de materia seca. El resultado se observa en la Figura 17, en donde los tratamientos compuestos de residuos de amaranto y estiércol, son los únicos que alcanzaron a producir un poco más de grano que el resto de los tratamientos, a pesar de haber sido castigados también con 15 días consecutivos sin aplicaciones de riego.

Los tratamientos de residuos de maíz, abono verde, suelo con y sin retenedor y los de acolchado orgánico y el de composta, fueron los más afectados en producción de grano, por efectos de la sequía.

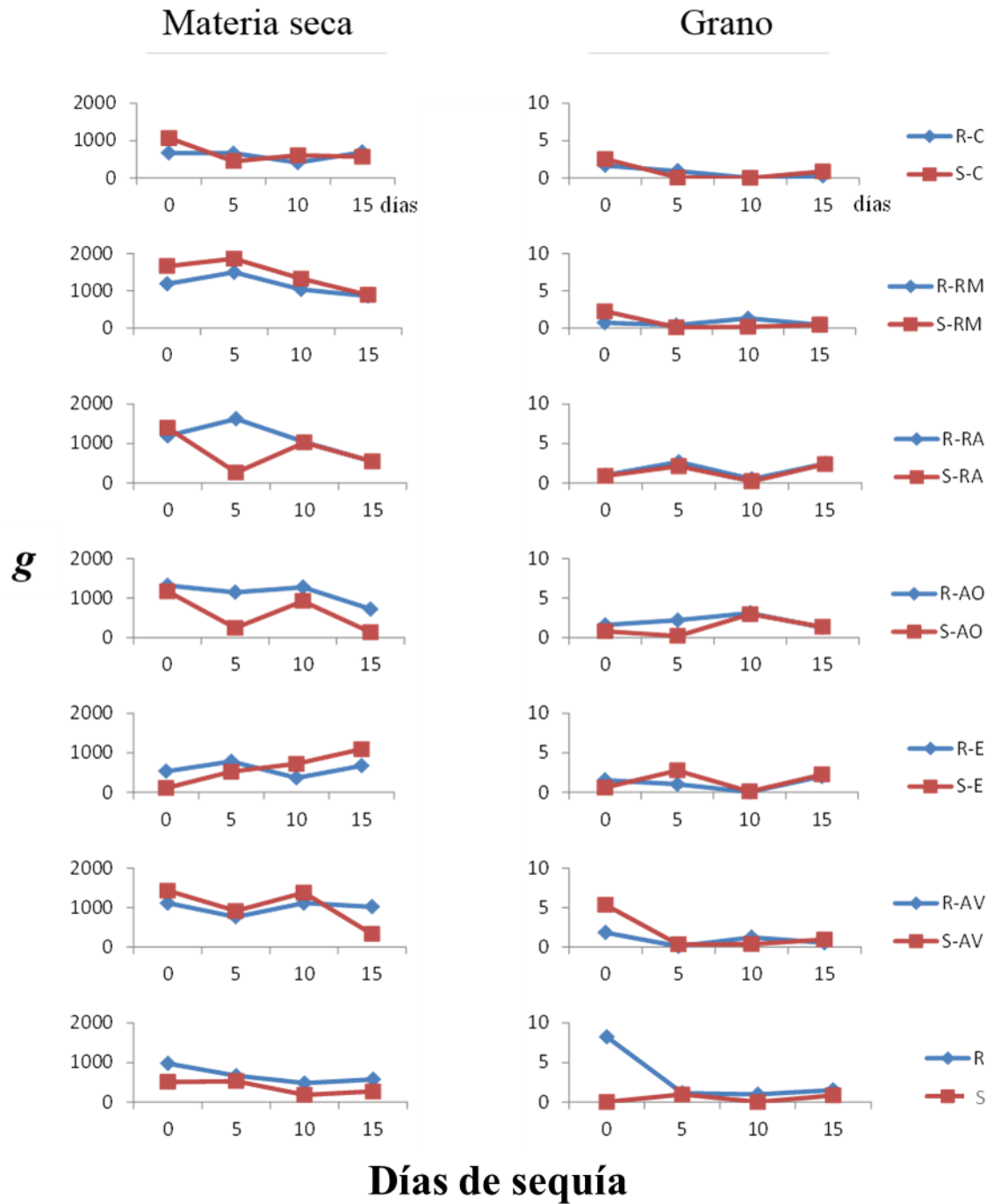


Figura 17. Efecto del número de días de sequía sobre el rendimiento (g) de materia seca y de grano de amaranto en cada tratamiento; R-tratamiento = con retenedor; S-tratamiento = sin retenedor; S= suelo solo.

## DISCUSIÓN

De acuerdo a las curvas de retención de humedad realizadas en laboratorio, los residuos de amaranto y la alfalfa verde, eran las enmiendas más prometedoras para sostener plantas en cultivo, incluso 5 veces mayor que la composta; pero al observar los rangos de humedad aprovechable (cantidad de agua entre CC y PMP) los mayores valores están en (orden de importancia): residuos de amaranto (154.3%), residuos de maíz (121%) y alfalfa en verde (110.4%); en tanto los menores son: estiércol (39.4%), composta (18.1%) y por último, el suelo solo (10.9%).

El efecto positivo del uso de un retenedor de poliacrilato de potasio en la supervivencia y crecimiento de las plantas ya ha sido reportado en diferentes estudios (Titonelli, 2002; Chirino *et al.*, 2009; Nissen *et al.*, 2004), sin embargo, en el experimento realizado no se presentaron diferencias estadísticamente significativas en el contenido de humedad en el suelo, sino solamente en el número de plantas sobrevivientes. Este resultado puede deberse a la profundidad de muestreo que se tomó (5-10 cm) para las estimaciones de humedad, además de la hora de muestreo, que siempre fue cerca de medio día. La aplicación del hidrogel aplicada a los 10 cm de profundidad es una recomendación del proveedor, durante el trasplante de la plántula pudo verse reflejado su efecto en la sobrevivencia de las plantas pero no en las demás etapas vegetativas de la planta, siendo que la zona radicular de la planta de amaranto tiene una profundidad media de 100 cm (Box, J., 2012).

Existen diversos registros (Castellanos *et al.*, 1996) en los que se mencionan que las enmiendas orgánicas disminuyen la densidad aparente, incrementan la porosidad y se favorece la formación de agregados, lo que repercute positivamente en la retención de humedad. Pero del experimento no se derivan efectos contundentes de retención de humedad en el suelo con la aplicación de enmiendas orgánicas, posiblemente porque ya existía una respuesta positiva por los 3.73% de MO que contiene el suelo, es decir 327 Kg de MO m<sup>-2</sup>, en los 30 cm de profundidad de la capa arable, cuando las aplicaciones realizadas fueron de 4.5 kg m<sup>-2</sup>, solamente 1.4% más; y además sin haberse completado su incorporación al suelo debido a que las enmiendas, con excepción de la composta y el estiércol, estaban como residuos de cosecha. También Barzegar (2002) no presentó cambios en el contenido de

humedad en el suelo a bajos potenciales (<100 KPa) de acuerdo a la tasa de descomposición y tipo de materiales orgánicos.

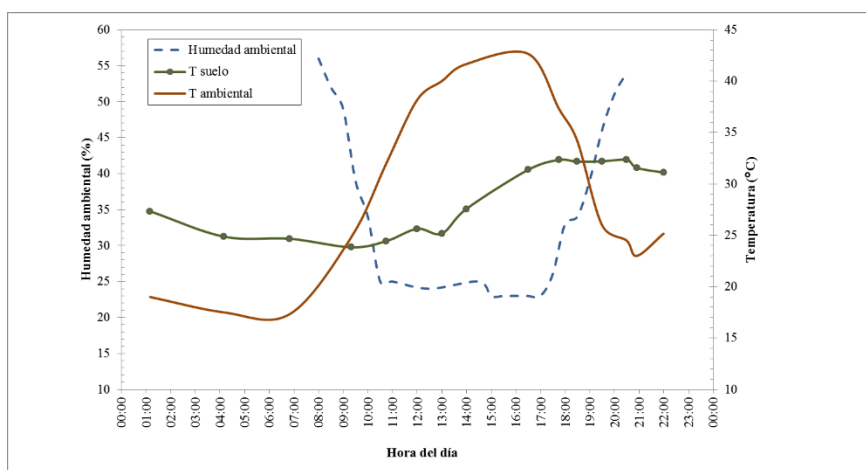
En cuanto a las dosis, González *et al.* (2013) obtuvieron un buen porcentaje de humedad en suelo con un tratamiento de 60 t ha<sup>-1</sup> de estiércol (65% de humedad), superando significativamente al fertilizante químico (58.29%) y al testigo (53.76%). López *et al.* (2010) encontraron que la aplicación de 40 t ha<sup>-1</sup> y 60 t ha<sup>-1</sup> de estiércol bovino fue el que mejor retuvo y conservó la humedad a través del tiempo; resultados similares fueron reportados por Salazar *et al.* (2009).

Un estudio realizado en México con chile (*Capsicum annuum* L.) utilizando como tratamientos tres dosis de composta concluye que a mayor cantidad de composta, menor evapotranspiración, lo que concuerda con la mayor capacidad de retención de humedad con los diferentes tratamientos (Nieto *et al.*, 2002). Cabe resaltar que la dosis utilizada en este experimento (45 t h<sup>-1</sup>) pudiera resultar poco sostenible, principalmente porque es una zona de seco donde las cantidades de materiales orgánicos que se producen en cada cosecha anual no son abundantes.

Los efectos sobre las plantas se hacen evidentes, en el desarrollo vegetativo del amaranto, en las variables de altura de la planta y diámetro del tallo. Esto coincide con Esqueda (2005), quien encontró que la secuencia con mayor nivel de humedad presenta el mejor porcentaje de emergencia y sobrevivencia en diferentes tipos de gramíneas en tres tipos de suelo. En este caso pueden considerarse que las mejores enmiendas fueron los residuos de cosecha, especialmente el de maíz, la cual funciona tanto mezclado con el suelo (RM) como depositado sobre él (AO). Sin embargo, llama especial atención este efecto, porque también puede relacionarse con su capacidad de amortiguamiento del pH de 7.8 del suelo, en donde el pH de 4.8 de los residuos de maíz pudiera favorecer una mejor absorción de nutrientes del suelo y permitir un mayor crecimiento de las plantas.

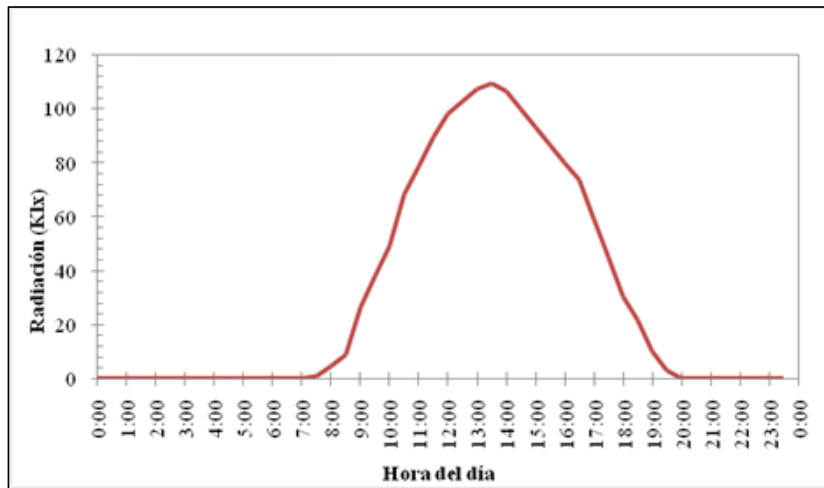
Otros aspectos importantes en la capacidad de retención de humedad en campo y crecimiento y desarrollo de las plantas, son el régimen de temperatura y humedad ambientales a las cuales las plantas están expuestas porque influyen en sus procesos fisiológicos y rendimiento potencial. El amaranto está considerado como una especie tolerante a la sequía, sin embargo debe presentar límites aceptables, Granados *et al.* (2004) mencionan que las condiciones térmicas óptimas son de 16 a 24° C y de 800 a 1,200 mm. En el sitio de estudio las

fluctuaciones diarias nos dan información realista del ambiente y del suelo para el crecimiento de las plantas siendo los valores de temperatura muy superiores, y menor la precipitación recomendada. La Figura 18, muestra las variaciones que tiene la temperatura tanto ambiental como la del suelo durante 24 horas, registrada en medio del periodo de sequía inducida; la máxima ambiental fue de 42.7°C, a las 16:30 horas, en tanto que los valores obtenidos en suelo entre 10-15 cm de profundidad, alcanza un máximo de 32.3°C, entre las 17:30 y 20:30 horas. El proceso de calentamiento del ambiente y del suelo por influencia del sol viene de al menos tres horas antes, siendo la máxima radiación a las 13:30 horas (Figura 15). Si bien hay variaciones de la temperatura del suelo (23.83 - 32.33 °C), ese medio sigue siendo un amortiguador para las raíces de las plantas.



**Figura 18. Temperatura del suelo y temperatura y humedad ambientales durante el mes de abril, en el sitio de estudio.**

Con los valores de temperaturas y humedad ambiental, pudiera considerarse al sitio de estudio como un ambiente hostil para las plantas de amaranto, porque pueden reprimir los efectos de retención de humedad, sobre todo en los primeros 10 o 15 cm de profundidad, a pesar de la textura franca que presenta el suelo del sitio en estudio, que pudiera favorecer la retención de humedad (Kaúrichev, 1980); aun así los productores agrícolas prefieren cultivar esta especie, debido a que otras difícilmente pueden prosperar, solamente utilizan riegos de auxilio por la disponibilidad limitada de agua en esa región.



**Figura 19. Comportamiento de la radiación a lo largo del día.**

En relación a la producción de materia seca y grano, vale la pena recordar que el retenedor fue más efectivo para la producción de materia seca en los tratamientos de residuos de amaranto, abono verde y acolchado orgánico, siempre que no pasara una sequía mayor de 10 días; aunque con la sequía de 15 días casi todos tuvieron rendimientos disminuidos, algo similar como sucedió con los rendimientos de grano.

También es importante observar que las plantas más desarrolladas, es decir con mayor producción de materia seca, se presentaron en el tratamiento de residuos de maíz, con y sin retenedor, en residuos de amaranto con retenedor, todos ellos a los 5 días de sequía; y en residuos de amaranto, acolchado orgánico y abono verde, todos ellos con 10 días de sequía.

Es posible que el comportamiento de rendimientos de materia seca y de grano en todos los tratamientos con aplicaciones de materiales orgánicos, no se deba solamente a los efectos de sequía inducida, sino que los tiempos de crecimiento y preparación para la producción de biomasa vegetal o de grano coincidieran con los tiempos de aportaciones de nutrimentos de los materiales orgánicos aplicados con los de absorción de nutrimentos, es decir que coincidiera con la tasa de descomposición de esos materiales orgánicos.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La aplicación de enmiendas orgánicas no tuvo efectos significativos en la humedad del suelo, sin embargo, mejoró hasta en un 10.3% la sobrevivencia de las plantas; 23.21%, en el diámetro de tallo; y 25.79%, en la altura de las plantas, respecto al suelo sin ninguna aplicación.

La aplicación de un hidrogel aumentó en un 4.48% la sobrevivencia postransplante de las plantas de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.).

Una sequía de 5 días se afecta en un 6% en el crecimiento del tallo de la planta de amaranto; de 10 días, 13% y de 15 días, 18%, respectivamente. Mientras que en la altura de la planta, una sequía de 5 días no afecta considerablemente; pero sí a los 10 días (14%) y aún más a los 15 días (22%).

Una disminución mayor al 20% de la altura de las plantas *A. hypochondriacus* L., posiblemente ya no tenga caso proseguir con su cultivo.

El sitio en donde se realizó el estudio, presenta un ambiente hostil en la disponibilidad de humedad para las plantas de *A. hypochondriacus* L., por lo que solamente bajo riego puede tener un desarrollo vegetativo aceptable.

Se entiende que la producción de materia seca y de grano fueron afectados por la sequía inducida, aunque quedan pendientes otras preguntas, debido a que este periodo de sequía se ubicó a propósito en la mitad del ciclo de cultivo, teniendo posteriormente un periodo de posible “recuperación” para la producción.

Se recomienda realizar otros estudios respecto al efecto de la sequía inducida al inicio y al final del ciclo de cultivo.

## LITERATURA CITADA

- Arrieche, I. y Mora, O. 2005. Efecto de la aplicación de residuos orgánicos sobre el cultivo del maíz en suelos degradados del Estado Yaracuy, Venezuela. *Bioagro* 17 (3): 155-159.
- Barba de la Rosa, A. P., Fomsgaard, I., Laursen, B., Mortensen, A., Olvera-Martínez, L., Silva-Sánchez, C., Mendoza-Herrera, A., González-Castañeda, J., De León-Rodríguez, A. 2009. Amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) as an alternative crop for sustainable food production: Phenolic acids and flavonoids with potential impact on its nutraceutical quality. *Journal of Cereal Science* 49 (1): 117-121.
- Barzegar, A. R., Yousefi, A. y Daryashenas, A. 2002. The effect of addition of different amounts and types of organic materials on soil physical properties and yield of wheat. *Plant and Soil* 247: 295–301.
- Box, J. 2012. Root demo Root Demographics and Their Efficiencies in Sustainable Agriculture, Grasslands and Forest Ecosystems: Proceedings of the 5th Symposium of the International Society of Root Research, held 14–18 July 1996 at Madren Conference Center, Clemson University, Clemson, South Carolina, USA. 82: 793 p.
- Bruinsma, J. 2009. The resource outlook to 2050: by how much do land, water use and crop yields need to increase by 2050? Reporte presentado en: Expert meeting on how to feed the world in 2050. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Casas, R. 2012. El suelo de cultivo y las condiciones climáticas. Editorial Paraninfo. España 235 pp.
- Castellanos, J. Z., Márquez, J., Etchever, J., Aguilar, A. y Salinas, J. R. 1996. Efecto de largo plazo de la aplicación de estiércol de ganado lechero sobre el rendimiento de forrajes y las propiedades de un suelo en una región irrigada del norte de México. *Terra* 14: 151-158.
- Comercializadora Internacional México. 2009. Cristales inteligentes de agua. Disponible en: <http://www.hidrogel.com.mx/>
- CONAGUA. 2012. Atlas del agua en México 2012 Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México 133 pp.

- CONAGUA. 2012. Mapa digital del agua México 2012. Sistema Nacional de Información del Agua.
- CONAGUA. 2013. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Valle de Tehuacán (2105), estado de Puebla. México.
- CONAGUA. 2014. Estadísticas del Agua en México, edición 2014, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA. 2015. Monitor de sequía en México. Disponible en: [http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=20&Itemid=74](http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=20&Itemid=74).
- De la Cruz, G. y Arriaga, A. 1996. Respuestas morfológicas y fisiológicas de *Amaranthus hypochondriacus* L. bajo tres niveles de humedad aprovechable. Rev. Chapingo. Serie Horticultura 2 (5):113 –120.
- Díaz-Ortega, A. C., Escalante-Estrada, J. A., Trinidad-Santos, A., Sánchez-García, P., Mapes-Sánchez, C., Martínez-Moreno, D. 2004. Rendimiento, eficiencia agronómica del nitrógeno y eficiencia en el uso del agua en amaranto en función del manejo del cultivo. Terra Latinoamericana, 22(1): 109-116.
- Duncan, A. 1981. Amaranth grain production guide. Organic Gardening and Farming Research Center. Rodale Press Inc.
- Espitia-Rangel, E., Mapes-Sánchez, E. C., Núñez-Colín C. A., y Escobedo-López, D. 2010. Distribución Geográfica de las Especies Cultivadas de *Amaranthus* y de sus parientes silvestres en México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 1(3) 427-437.
- FAO. 2011. Looking ahead in world food and agriculture: Perspectives to 2050. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/014/i2280e/i2280e.pdf>
- FAO. 2013. Afrontar la escasez de agua. Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. Informe sobre temas hídricos. Cooperación Italiana para el Desarrollo. Roma 79 pp.
- FAO. 2014. Material de formación: Conservación de los recursos naturales para una Agricultura sostenible. Disponible en: [http://www.fao.org/ag/ca/training\\_materials/cd27-spanish/fme/economic.pdf](http://www.fao.org/ag/ca/training_materials/cd27-spanish/fme/economic.pdf)
- Flores, H. E. y Ruíz, J. A. 1998. Estimación de la humedad del suelo para maíz de temporal mediante un balance hídrico. TERRA 16 (3): 219-229.

- Forero, F. E.; Fernández, J. P.; Álvarez-Herrera, J. G. 2010. Efecto de diferentes dosis de cachaza en el cultivo de maíz (*Zea mays*). Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 13 (1): 77-86.
- FUSDA. 2008. Medio ambiente y desarrollo: hacia un manejo sustentable del agua. Fundación por la Socialdemocracia de las Américas, A.C. México 1: 35-42.
- Givi, J., Prasher, S. O. y Patel, R. M. 2004. Evaluation of pedotransfer functions in predicting the soil water contents at field capacity and wilting point. Agricultural Water Management 70: 84 – 96.
- Goldberg, A. D. y Covas, G. 1988. Actas de las primeras jornadas nacionales sobre amarantos. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de La Pampa, Santa Rosa, Argentina.
- González, J., Fortis, M., Orona, I., Vázquez, C., Omaña, J. y Molina, J. 2013. Estiércol de bovino y fertilización foliar en la producción de maíz forrajero. Memorias del VII Congreso Nacional de Agricultura Sostenible. Agricultura Orgánica. 165-179.
- Granados, R., Reyna, T., Soria, J., y Fernández, Y. 2004. Aptitud agroclimática en la Mesa Central de Guanajuato, México. Investigaciones geográficas, 54: 24-35.
- INEGI. 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos San Gabriel Chilac, Puebla Clave geoestadística 21124.
- Kaúrichev. 1980. I.S. Prácticas de edafología. MIR. Moscú.
- Ley de Aguas Nacionales. Diario Oficial de la Federación. 4 de abril de 2004. México.
- López-Martínez, J. D., A. Díaz-Estrada, E. Martínez-Rubín, y R. D. Valdez-Cepeda. 2001. Abonos orgánicos y su efecto en propiedades físicas y químicas del suelo y rendimiento en maíz. Terra Latinoamericana 19 (4): 293-299.
- Mora, E. 2008. Evaluación de etapas fenológicas en el cultivo de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*) para su comercialización y producción. Tesis. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, México 16-20.
- Moreno, M.; Yáñez, M. J.; Rojas, R.; Zavaleta, E.; Trinidad-Santos, A. y Arellano, J. L. 2005. Diversidad de hongos en la semilla de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.) y su caracterización molecular. Rev. Mex. Fitopatol. 23:111-118.
- Mujica, A. y Berti, M. 1997. El cultivo del amaranto (*Amaranthus* spp.): producción, mejoramiento genético y utilización. FAO, UNA y UDEC. Perú 145 pp.

- Namara, R. E., Hanjra, M. A., Castillo, G. E., Munk Ravnborg, H., Smith, L. y Van Koppen, B. 2010. Agricultural water management and poverty. *Agricultural water management*. Elsevier. 97: 520-527.
- Nieto, C. 1990 Identificación de microcentros de variabilidad en quinua, amaranto y chocho en Ecuador INIAP, EE. Santa Catalina. Publicación Miscelánea N° 52. Quito, Ecuador 15 pp.
- Nieto, A., Murillo, B., Troyo, E., Larrinaga, J. A., García, J. L. 2002. El uso de compostas como alternativa ecológica para la producción sostenible del Chile (*Capsicum annuum* L.) en zonas áridas. *Interciencia* 27 (8): 417-421.
- Nissen, J. y San Martin, K. 2004. Uso de poliacrilamidas y el riego en el manejo hídrico de lechugas (*Lactuca sativa* L.). *Agro sur*, 32 (2) 1-12.
- Omami, E. N., Hammes, P. S., y Robbertse, P. J. 2006. Differences in salinity tolerance for growth and water-use efficiency in some amaranth (*Amaranthus* spp.) genotypes. *New Zeal. J. CropHort.Sci.* 34: 11-22.
- Plaza, M. E. 2006. Síntesis de hidrogeles a partir de acrilato de sodio y metacrilamida para liberación controlada de fertilizantes. Tesis de pregrado. Universidad del Valle. Cali, Colombia.
- PNUD. 2006. Informe sobre Desarrollo Humano 2006 - Más allá de la escasez: Poder, pobreza y crisis mundial del agua. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo 133-170.
- Radillo, F., Aguilar, S., Flores, M. y Martínez, J. 2013. Efecto de abonos orgánicos y fertilizantes inorgánicos en la producción de grano seco de maíz (*Zea mays* L.). Memorias del VII Congreso Nacional de Agricultura Sostenible. Agricultura Orgánica BUAP. México 1-11.
- Radillo, F., Aguilar, S., Flores, M. y Padilla, A. 2013. Efecto de acolchados orgánicos para la producción y calidad en cultivo de sandía (*Citrulluslanatus* Schard.). Memorias del VII Congreso Nacional de Agricultura Sostenible. Agricultura Orgánica. BUAP. México 12-21.
- Rivera, C., Baeza, C. y Chavarriaga, W. 2007. Efecto de un retenedor de agua y dosis crecientes de fertilizantes foliares sobre la producción de tomate chonto y larga vida bajo cubierta plástica agroclear. *Agronomía*. 15(1): 103 – 119.

- Rodas, B. y Bressani, R. 2009. Contenido de aceite, ácidos grasos y escualeno en variedades crudas y procesadas de grano de amaranto. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* 59 (1): 82-87.
- Salazar-Sosa, E. H. I., Trejo-Escareño, C. Vázquez-Vázquez, J. D., López-Martínez, M. Fortis-Hernández, R., Zuñiga-Tarango y J. P. Amado-Álvarez. 2009. Distribución de nitrógeno disponible en suelo abonado con estiércol bovino en maíz forrajero. *Terra Latinoam.* 27: 373-382.
- SEMARNAT. 2011. Estadísticas del agua en México, edición 2011. CONAGUA México.
- Setien, G. E. y Velasco, P. A. 1999. Tehuacán horizonte del tiempo. Club Reforma Tehuacán Manantiales. Alternativas y Procesos de Participación Social A. C. Tehuacán, Puebla. 523 pp.
- SIAP 2013. Disponible en: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/>
- Suquilanda, M. 1995. Serie agricultura orgánica. Quito, EC. Fundación para el desarrollo agropecuario. 25 – 32 p.
- Taboada, M. y Guadarrama, R. 2007. Potencialidad Agroclimática para el cultivo de Amaranto (*Amaranthus cruentus* L.) en el Estado de Morelos, México. *Investigación Agropecuaria* 4. 123-136 p.
- Trinidad, S. A., Gómez, L. F., Suárez, R.G. 1986. El Amaranto: Su cultivo y aprovechamiento. Primer seminario nacional de amaranto. Chapingo, México. 557 pp.
- UNESCO. 2005. Evaluación de Parámetros y Procesos Hidrológicos en el Suelo. Documentos Técnicos en Hidrología del PHI, número de serie 71. Chile 140 p.
- UNESCO. 2006. 2º Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo: El Agua, Una Responsabilidad Compartida. Barcelona. 550 p.
- Villaman, R., Tijerina, L., Quevedo, A y Crespo, G. 2001. Comparación de algunos métodos micrometeorológicos para estimar la evapotranspiración, en el área de Montecillo, México. *Terra Latinoamericana* 19 (3): 281-291.
- Xiaoming Zhua,b, Hanxi Yang , Yuliang Caoa, Xingping Ai 2004. Preparation and electrochemical characterization of the alkaline polymer gel electrolyte polymerized from acrylic acid and KOH solution. *Electrochimica Acta* 49: 2533–2539