

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



EVALUACIÓN DEL ACRILATO DE POTASIO PARA REDUCIR EL
CONSUMO DE AGUA EN EL CULTIVO DE TOMATE (*Solanum
lycopersicum* L.) EN INVERNADERO.

Tesis

Que presenta ALICIA GARCÍA MORENO

como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS AGRARIAS


Torreón, Coahuila

Diciembre 2021

EVALUACIÓN DEL ACRILATO DE POTASIO PARA REDUCIR EL
CONSUMO DE AGUA EN EL CULTIVO DE TOMATE (*Solanum
lycopersicum* L.) EN INVERNADERO.

Tesis

Elaborada por ALICIA GARCÍA MORENO como requisito parcial para
obtener el grado de Maestro en Ciencias Agrarias con la supervisión y
aprobación del Comité de Asesoría



Dr. Pedro Cano Ríos
Asesor principal



Dr. José Luis Reyes Carrillo
Asesor



Dr. Héctor Mario Quiroga Garza
Asesor



Dr. Vicente de Paul Alvarez Reyna
Asesor



Dra. Leticia Romána Gaytán Alemán
Jefe del Departamento de Postgrado



Dr. Marcelino Cabrera De La Fuente
Subdirector de Postgrado

AGRADECIMIENTOS

Doctor Pedro Cano Ríos, por aceptar ser mi asesor principal en este proyecto y dirigirme con su experiencia. Agradezco por su paciencia y por la disposición en todo momento, sin usted no habría sido posible el análisis de los datos recolectados durante la evaluación del proyecto.

Doctor José Luis Reyes Carillo, principalmente por su amistad, por la dedicación al proyecto y por su disponibilidad de tiempo en todo momento. Sobre todo, le agradezco por compartirme sus conocimientos ya que gracias a ello se pudo hacer una buena revisión de literatura y análisis de la información científica.

Doctor Héctor Mario Quiroga Garza, por sus enseñanzas y dedicación durante el periodo que duró la maestría.

DEDICATORIA

A mis padres **Agustín García León** y **Ofelia Moreno Mendoza**, por estar siempre presente en mi vida, por brindarme su apoyo incondicional, quisiera poder recompensar un poco de todo lo que me han dado. Ustedes son el pilar de mi vida, este logro tan importante es para ustedes.

A mi esposo **Alexis Madariaga Roque**, por todo el apoyo que me has brindado en estos años maravillosos, por todo lo vivido y por nuestra hermosa familia. Te agradezco infinitamente por creer en mí incluso cuando yo dejo de hacerlo.

A mi hijo **Elian Sebastián Madariaga García**, por ser mi nuevo motor de vida, mi inspiración y mi fuerza. Desde que naciste mi vida tiene otros colores, espero algún día puedas leer estas líneas.

A mis **hermanas y hermanos**, quiero que este logro sea una inspiración para ustedes, para que sueñen en grande y nunca renuncien a sus sueños. Quiero que sepan que ustedes pueden lograr grandes cosas, que los límites no existen, las únicas barreras son mentales.

A mi amiga **Araceli Zapata Ramos**, por la dicha de tenerte como amiga y conocerte en esta etapa tan importante. Porque además de ser mi compañera me has brindado tu apoyo incondicional y desinteresado.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	i
DEDICATORIA	iv
ÍNDICE DE CUADROS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRAC.....	x
INTRODUCCIÓN.....	1
1 REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
1.1 El cultivo de tomate	4
1.1.1 Taxonomía	4
1.1.2 Necesidades hídricas del tomate	4
1.2 Hidroponía	5
1.3 Importancia del agua en la agricultura.....	7
1.3.1 Problemas del agua en la agricultura	8
1.4 Hidrogeles	11
1.4.1 Mecanismo de absorción de agua de hidrogel	12
1.4.1 Características de los hidrogeles agrícolas.....	14
1.4.2 Uso de los hidrogeles	16
1.4.3 Orígenes.....	17
1.4.4 Tipos y componentes	18
1.4.5. Usos en la agricultura.....	19
1.5 Acrilato de potasio	22
1.5.1 Formula química.....	22
1.5.2 Propiedades físicas y químicas	22
1.5.3 Información ecológica.....	23
1.6 Evaluación de los hidrogeles en la agricultura.....	23
2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	27
2.1 Localización	27
2.2 El invernadero	27
2.3 Siembra	27
2.4 Tratamientos.....	27
2.4.1 Prueba preliminar (acrilato de potasio).....	28

2.5	Trasplante.....	28
2.6	Riego	28
2.7	Labores culturales	29
2.8	Cosecha	29
2.9	Diseño Experimental.....	29
2.10	Variables a evaluar	29
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
3.1	Fenología (crecimiento y grosor del tallo), temperatura y humedad relativa	30
3.1.1	Crecimiento	30
	Cuadro 2.	31
3.1.3	Temperatura.....	32
3.1.4	Humedad Relativa	33
3.2	Calidad y rendimiento	34
3.2.1	Diámetro polar	34
3.2.2	Diámetro ecuatorial	35
3.3	Rendimiento ton ha ⁻¹	37
3.4	Agua	39
3.4.1	Análisis económico.....	41
4	CONCLUSIONES	45
5	REFERENCIAS	46
6	ANEXOS.....	52

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Resultados de los análisis de varianza para los factores estudiados, acrilato, sustratos y variedades en las diferentes variables estudiadas. UAAAN-UL 2021.....	30
Cuadro 2. Ecuaciones de regresión para crecimiento y grosor del tallo en tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) en invernadero. UAAAN-UL, 2021.....	31
Cuadro 3. Huella hídrica del tomate en invernadero utilizando tres y seis gramos de acrilato de potasio/litro de sustrato. UAAAN-UL,2021.....	39
Cuadro 4. Ingreso marginal al utilizar tres y seis gramos de acrilato de potasio/litro de sustrato en el cultivo de tomate en invernadero. UAAAN-UL, 2021.....	43
Cuadro 5. Comparación entre el costo del agua ahorrada en los tratamientos con acrilato de potasio y el Cmg. UAAAN-UL, 2021.....	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. Oscilación térmica dentro y fuera del invernadero. UAAAN-UL, 2021.....	32
Figura 3. Humedad relativa máxima y mínima dentro del invernadero. UAAAN-UL, 2021.....	33
Figura 4. Humedad relativa media dentro y fuera del invernadero. UAAAN-UL, 2021.	33
Figura 5. Comparación de medias para la variable diámetro polar obtenido en el factor acrilato*sustrato en tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) bajo condiciones de invernadero. UAAAN-UL, 2021.	34
Figura 6. Comparación de medias para la variable diámetro ecuatorial obtenido en el factor acrilato*sustrato en tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) bajo condiciones de invernadero. UAAAN-UL, 2021.	35
Figura 7. Comparación de medias para la variable rendimiento total obtenido en el factor acrilato*sustrato en tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) bajo condiciones de invernadero. UAAAN-UL, 2021.	37
Figura 8. Huella hídrica del tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) en invernadero en los tratamientos con y sin acrilato de potasio. UAAAN-UL, 2021.....	40

RESUMEN

EVALUACIÓN DEL ACRILATO DE POTASIO PARA REDUCIR EL CONSUMO DE AGUA EN EL CULTIVO DE TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.) EN INVERNADERO.

ALICIA GARCÍA MORENO

MAESTRÍA EN CIENCIAS AGRARIAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

PHD PEDRO CANO RÍOS

Director de Tesis

Los hidrogeles son materiales que absorben grandes cantidades de agua sin disolverse, se han propuesto ampliamente para fines hortícolas para mejorar la disponibilidad de agua para las plantas. El objetivo de este proyecto fue evaluar el acrilato de potasio para reducir el consumo de agua en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en invernadero. Se evaluaron dos dosis de acrilato de potasio (AP) (tres y seis gramos por litro de sustrato), dos sustratos (arena y la mezcla: 50 % arena – 40 % compost – 10 % perlita) y dos variedades (Aquiles y Moctezuma). Los tratamientos se distribuyeron en un diseño experimental en bloques al azar. Las variables evaluadas fueron: altura de planta, grosor del tallo, diámetro polar y ecuatorial del fruto, rendimiento y huella hídrica. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas para las variables diámetro polar, diámetro ecuatorial y rendimiento. El rendimiento se incrementó cuando los sustratos fueron tratados con AP. La huella hídrica se redujo hasta un 21 % en el sustrato arena y un 20.1 % en el sustrato mezcla con la dosis de seis gramos. El ingreso marginal (Img) fue superior respecto al costo marginal (Cmg) en las dos dosis analizadas. Lo anterior demostró que el Img obtenido fue lo suficiente para justificar el uso del AP, aunque el aumento en la dosis no mostró diferencias estadísticas en el rendimiento. El uso del AP ayuda a ahorrar agua cuando se incorpora a diferentes sustratos, además de aumentar el rendimiento y la calidad de los frutos.

Palabras clave: *Sustratos, dosis, hidrogel, huella hídrica, consumo, ahorro.*

ABSTRAC

EVALUATION OF POTASSIUM ACRYLATE TO REDUCE WATER CONSUMPTION IN GREENHOUSE CROP OF TOMATO (*Solanum lycopersicum* L.).

ALICIA GARCÍA MORENO

MAESTRÍA EN CIENCIAS AGRARIAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

PHD PEDRO CANO RÍOS

Thesis director

Hydrogels are materials that absorb large amounts of water without dissolving, they have been widely proposed for horticultural purposes to improve the availability of water for plants. The objective of this project was to evaluate potassium acrylate to reduce water consumption in greenhouse tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.). Two doses of potassium acrylate (AP) were evaluated (three and six grams per liter of substrate), two substrates (sand and the mixture: 50% sand - 40% compost - 10% perlite) and two varieties (Aquiles and Moctezuma) . The treatments were distributed in an experimental design in randomized blocks. The variables evaluated were: plant height, stem thickness, polar and equatorial diameter of the fruit, yield and water footprint. Statistically significant differences were found for the variables polar diameter, equatorial diameter and yield. The yield increased when the substrates were treated with AP. The water footprint was reduced up to 21% in the sand substrate and 20.1% in the mixed substrate with the dose of six grams. Marginal revenue (Img) was higher than marginal cost (Cmg) in the two doses analyzed. The above showed that the Img obtained was sufficient to justify the use of AP, although the increase in the dose did not show statistical differences in performance. The use of PA helps to save water when it is incorporated into different substrates, in addition to increasing the yield and quality of the fruits.

Keywords: *Substrates, dose, hydrogel, water footprint, consumption, savings.*

INTRODUCCIÓN

En México el tomate es considerada la hortaliza número uno en exportación. Anualmente en el país se producen más de 3 millones 800 mil toneladas en una superficie de más de 49 mil 400 hectáreas(SADER, 2020).

Dentro de los cultivos de invernadero, el tomate tiene gran importancia a nivel nacional como internacional tanto en la economía agrícola como en la alimentación (SAGARPA, 2017). La planta de tomate se caracteriza por tener un tallo voluble y largo, además de un sistema radicular pivotante, profundo y poco ramificado. Sus tallos y ramas son de consistencia herbácea, por lo cual la planta no se sostiene por sí sola y es necesario el empleo de tutores para su sostén. Las flores se encuentran agrupadas en inflorescencia de racimo o cimas racimosas (SAGARPA, 2017). Cuando el tomate se establece en suelo el consumo diario de agua por metro cuadrado varía de entre 2 a 3 litros, mientras que en sustrato oscila entre 2 y 4 litros (más 30 %, que corresponde al drenaje). La demanda hídrica del cultivo en hidroponía puede determinarse mediante métodos directos como la bandeja de drenaje y métodos indirectos como por radiación (INTAGRI, 2018).

La población mundial para el año 2050 alcanzará 9,000 millones de personas, por lo cual el sector agrícola tiene el reto de cubrir la creciente demanda de alimentos, lo que significa una mayor cantidad de agua (FAO, 2019). La disminución de los recursos hídricos junto con los crecientes impactos del calentamiento global y los cambios climáticos y las crecientes demandas de una población cada vez mayor hacen que la utilización efectiva de los recursos hídricos sea una necesidad. Las crecientes demandas de los sectores también agotan estos recursos subterráneos, contaminan los ecosistemas hídricos y el desarrollo de nuevos recursos se está volviendo más caro cada día (Ayas, 2019). El crecimiento económico, el desarrollo y la población ejercen presión sobre los recursos hídricos, los cálculos sugieren que de seguir con las prácticas actuales para el año 2030 el mundo enfrentará un déficit del 40% entre la demanda proyectada y suministro del agua disponible. El uso del agua se ha multiplicado por seis en los últimos 100 años (Ramos-Cruz *et al.*, 2018).

El estrés por agua de riego es uno de los principales factores limitantes que afectan el crecimiento del cultivo, productividad y calidad de la fruta. La productividad del cultivo a menudo también está limitada por las propiedades físicas y químicas adversas del suelo, como las bajas tasas de infiltración, así como la baja retención de agua y la baja capacidad de intercambio de cationes (Nirmala y Thirupathaiiah, 2019).

La necesidad de alimentar mejor a una población mundial en crecimiento desafiará la dependencia agrícola del agua tal como la conocemos, una fracción alta de vegetales producidos en invernadero ayudaría aún más. Hay varias razones para esto: en primer lugar, el ambiente de invernadero generalmente logra una mayor productividad y eficiencia de transpiración que la producción de campo; en segundo lugar, los productores de invernaderos suelen tener mejores herramientas y habilidades para el manejo del agua (Stanghellini, 2014).

Los hidrogeles son materiales reticulados que absorben grandes cantidades de agua sin disolverse y absorben cantidades sustanciales de soluciones acuosas, son polímeros sintéticos generalmente hechos de productos derivados del petróleo que absorben muchas veces su peso en agua (Neethu *et al.*, 2018) y se han propuesto ampliamente para fines hortícolas durante los últimos 40 años con la idea básica de utilizar las propiedades de hinchamiento y liberación de agua para mejorar la disponibilidad de agua para las plantas (Montesano *et al.*, 2015). Entre los países con mayor demanda del producto se encuentran los siguientes: China, Japón, Estados Unidos, Alemania y países de Medio Oriente (Serna y Guancha, 2017).

Algunas de sus características principales son: capacidad de hidratación, suministro y rehidratación, reduce las necesidades de irrigación y el estrés hídrico en las plantas, mejora el éxito en los trasplantes, incrementa la germinación y el crecimiento de las plantas, evita la compactación del sustrato y la formación de costras, reduce la pérdida de sustancias nutritivas, previene la erosión del terreno y se mantiene activo por muchos años (Portalfruticola.com, 2017).

Cuando el hidrogel se mezcla con el suelo, forma una masa similar a la gelatina amorfa asociada a la hidratación y es experto en absorción y desorción durante un tiempo prolongado, por lo tanto, actúa como un suministro lento de agua en el suelo (Abobatta, 2018).

Es posible que con el uso de acrilato de potasio incorporado a los sustratos, disminuirá el consumo de agua de riego en el cultivo, mejorando el crecimiento y desarrollo de las plantas, además de obtener un aumento en la calidad y producción. El objetivo de este estudio fue evaluar el acrilato de potasio para reducir el consumo de agua de riego en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L). en invernadero.

1 REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 El cultivo de tomate

El tomate es una planta perteneciente a la familia de las Solanáceas, su origen esta datado en América del sur principalmente en las zonas andinas de Perú, Ecuador, Bolivia y Chile, sin embargo se sabe que se domesticó en México (Medina-Saavedra *et al.*, 2017). A nivel mundial el tomate es una de las hortalizas con mayor valor económico, además de ser uno de los primeros cultivos producidos en hidroponía. México exporta tomate fresco a Estados Unidos y Canadá, y en la actualidad es el principal exportador de este producto a nivel mundial (Hydro-Environment, 2015).

El cultivo de tomate tiene como temperatura óptima de desarrollo entre 20 y 30 °C durante el día y entre 14 y 17 °C durante la noche. Las temperaturas superiores a los 30-35 °C afectan el desarrollo de la planta. La humedad relativa óptima para el cultivo oscila entre el 60 % y 80 % (Paredes, 2009; INIFAP, 2012).

1.1.1 Taxonomía

A continuación, se da a conocer la taxonomía de la planta de tomate.

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Subclase: Asteridae

Orden: Solanales

Familia: Solanaceae

Género: *Solanum*

Especie: *lycopersicum* (INTA, 2016).

1.1.2 Necesidades hídricas del tomate

El manejo adecuado del agua es importante en todos los cultivos, con ello se busca hacer un uso eficiente tanto del agua como de los fertilizantes para mantenerlos cerca de la raíz y evitar que sean lixiviados. Para manejar correctamente los riegos es necesario determinar la capacidad de retención de agua del suelo o del sustrato (INTAGRI, 2017b).

El cultivo de tomate es extremadamente sensible tanto al exceso como al déficit de riego. Para lograr un correcto desarrollo del cultivo se necesita manejar correctamente los riegos para evitar estrés por déficit o exceso de agua (Florido y Bao, 2014).

Las aplicaciones de riego influyen considerablemente en el rendimiento, el peso del fruto, el diámetro, la altura y la materia seca del cultivo de tomate (Ayas, 2019), aunque el efecto más evidente del estrés hídrico será la reducción del número y tamaño de frutos (INIA, 2017).

Diariamente el cultivo de tomate establecido en suelo consume entre 2 a 3 litros, mientras que en sustrato oscila entre 2 y 4 litros (INTAGRI, 2018). El riego deficitario reduce significativamente el rendimiento, además el crecimiento de plantas bajo déficit y exceso de agua aumenta la incidencia de frutos podridos y disminuye la incidencia de frutos maduros. La falta de riego afecta la cosecha y disminuye el rendimiento del cultivo (Da Silva *et al.*, 2019).

El monitoreo del estado del agua de la planta proporciona una importante fuente de información para la programación del riego. El estado del agua es crucial, particularmente en condiciones de riego deficitario, para evitar que un estrés hídrico moderado y potencialmente beneficioso se vuelva demasiado severo y reduzca el rendimiento (Meng *et al.*, 2017).

En un experimento con riego deficitario el rendimiento disminuyó considerablemente como resultado de la disminución en la cantidad de agua. Las disminuciones relativas del rendimiento en los tratamientos de riego fueron 4.1%, 6.7%, 11.1%, 10.0%, 10.3%, 11.8%, 7.5%, 9.0%, 11.4%, 6.3%, 9.2%, y 11.5% (Ayas, 2019). Si un estrés hídrico de leve a moderado dura muchos días al inicio de la estación, se puede producir un dosel visiblemente más pequeño, y por lo tanto, hay una menor producción de biomasa como resultado de una interceptación reducida de radiación (Battilani, 2012).

1.2 Hidroponía

El vocablo hidroponía proviene de dos palabras griegas *HYDRO* que significa agua y *PONOS* que significa trabajo. Es una serie de sistemas de producción en donde los nutrientes se agregan directamente al agua de riego y su aplicación es en forma artificial, en este sistema el suelo no

participa en la nutrición (Gilsanz, 2007). Según la definición del departamento de agricultura de los Estados Unidos, la hidroponía es un proceso de crecimiento de plantas en cultivo de solución de nutrientes, esta solución proporciona nutrientes a las plantas para el crecimiento normal de la planta (Malik, 2018). Los fertilizantes que contienen los nutrientes que se suministrarán al cultivo se disuelven en una concentración adecuada en el agua de riego y la solución resultante se denomina "solución nutritiva" (Putra y Yuliando, 2015).

La hidroponía es una industria exitosa y en rápida expansión en todo el mundo y está desarrollada en múltiples países desarrollados; la tecnología hidropónica es una tecnología intensiva en capital que implica el desarrollo de infraestructura que tiene un impacto positivo en la productividad y el crecimiento (Malik, 2018).

El concepto tradicional de eficiencia de la aplicación de riego en hidroponía se define como la relación entre la cantidad de agua utilizada por las plantas y la cantidad de agua aplicada. El riego es más eficiente cuando la cantidad de agua aplicada es más cercana a la cantidad de agua utilizada por las plantas, por lo tanto, el manejo del riego es crucial para una alta eficiencia en la aplicación de riego en sistemas basados en hidroponía (Mavrogianopoulos, 2016).

Los sistemas existentes que destacan en la hidroponía son: los sistemas de recirculación NFT (técnica de flujo de nutrientes) y NGS (técnica de flujo profundo) y los sistemas donde el medio de cultivo es un sustrato (INTAGRI, 2017a).

- NFT (técnica de flujo de nutrientes): en esta técnica una película de solución queda atrapada entre dos láminas de polietileno para formar un canal en crecimiento, esto proporciona un buen contacto entre la solución de recirculación y el aire, que es suficiente para mantener el nivel de oxígeno requerido por las raíces sin aireación adicional de la solución (Putra y Yuliando, 2015)
- Sistemas de producción en sustrato o abiertos: en esta técnica el sustrato que es un material sólido (natural o de síntesis) se coloca en un contenedor o bolsa para permitir el desarrollo del sistema radical y

el crecimiento del cultivo (INTAGRI, 2017a). Una desventaja importante de los sistemas abiertos es que se debe permitir que una proporción del agua y los nutrientes se desperdicien, esto reduce la eficiencia del uso del agua y contamina los suministros de agua subterránea con sales (Putra y Yuliando, 2015).

1.3 Importancia del agua en la agricultura

La historia de la civilización humana está entramada con la historia de las formas en que los humanos han aprendido a manipular y usar agua dulce. Las primeras comunidades agrícolas dependían de la lluvia natural y la escorrentía. Los avances de ingeniería llegaron con presas simples y canales de riego que permitieron una mayor producción de cultivos y temporadas de cultivo más largas. La expansión de las áreas urbanas eventualmente requirió el desarrollo de tuberías y acueductos sofisticados, para llevar agua a los usuarios, y de sistemas innovadores para eliminar los desechos, algunos de los cuales se implementaron hace miles de años (Gleick, 2003).

El agua es vida porque las plantas y los animales no pueden vivir sin agua, se necesita agua para garantizar la seguridad alimentaria, alimentar al ganado, dedicarse a la producción industrial y conservar la biodiversidad y el medio ambiente (Dar *et al.*, 2017). El agua es el principal determinante de la productividad terrestre (Bernacchi y VanLooche, 2015).

La optimización del uso de los recursos hídricos es estratégica para la competitividad a largo plazo de la industria agrícola; la creciente demanda mundial de agua combinada con los impactos del cambio climático ya está haciendo realidad la escasez de agua en muchas partes del mundo (Abobatta y Khalifa, 2019). El concepto de manejo sustentable del agua se refiere a todas las prácticas que mejoran el rendimiento de los cultivos y minimizan las pérdidas de agua. La creciente escasez de agua y la sequía señalan la necesidad de un enfoque más sostenible para la gestión de los recursos hídricos en la agricultura a nivel mundial, regional y local (Mancosu *et al.*, 2015).

El agua es utilizada por la agricultura para una serie de servicios críticos. El agua es necesaria para cultivar biota, para mantener el equilibrio de

temperatura dentro de las plantas, para lixiviar sales y otros minerales fuera de la zona de la raíz, y más. El agua desviada para la agricultura se agota por la transpiración de las plantas, por la evaporación del suelo y las superficies de agua libre, y por la filtración profunda al agua subterránea. Se puede considerar que parte de esta agua se usa de manera beneficiosa, mientras que una parte se pierde para usos no beneficiosos (Gleick, 2003).

La productividad de la planta puede verse limitada por una amplia gama de factores, que incluyen eventos de luz, agua, nutrientes, temperatura y perturbaciones, así como factores edáficos como la ausencia de suelo adecuado para el crecimiento. De estos factores, se supone que la temperatura y el agua son los principales impulsores de la productividad del ecosistema. Como tal, son la temperatura y el agua las que dictan los principales biomas del globo. Esto no sugiere que otros factores no sean importantes; sin embargo, estas limitaciones adicionales generalmente se consideran relevantes a escalas mucho más pequeñas que los factores climáticos (Bernacchi y VanLoocke, 2015).

La implementación de una programación de riego bien administrada podría contribuir considerablemente al ahorro de agua y mejorar aún más los beneficios de los agricultores sin comprometer los rendimientos. Para alcanzar la gestión sostenible de los recursos hídricos en la agricultura, se debe aplicar un enfoque integrado que combine los últimos hallazgos en investigación de cultivos, prácticas agrícolas y gestión del riego. De esta manera, se pueden elegir las opciones más rentables que alivien las cargas ambientales (El-Chami y El-Moujabber, 2016).

1.3.1 Problemas del agua en la agricultura

Para el 2050 se alcanzará una población 9,000 millones de personas, por lo cual el sector agrícola tiene el reto cubrir la demanda de alimentos proyectada para ese futuro cercano. Sin embargo una mayor producción de alimentos significa un mayor consumo de agua (FAO, 2019).

El énfasis en el desarrollo agrícola en el presente siglo se ha desplazado hacia el uso sostenible de la tierra, el agua y los recursos vegetales en la agricultura. El objetivo principal de la agricultura actual es maximizar la productividad de la tierra y el agua sin amenazar el medio ambiente y los

recursos naturales. Como cuestión prioritaria, uno de los principales roles de la agricultura es el suministro de alimentos y la seguridad, sin embargo, las tendencias emergentes indican un papel cada vez mayor con respecto a la gestión y conservación del suelo y el agua (Ekebafe *et al.*, 2011). En las próximas décadas, se impondrán nuevas restricciones a los suministros de agua disponibles para el riego y para la agricultura de secano. La demanda de uso de agua en la agricultura continuará aumentando como resultado del crecimiento demográfico y económico, se espera que las demandas no relacionadas con el riego crezcan aún más rápido, ejerciendo presión sobre los suministros disponibles para el riego (Rosegrant *et al.*, 2009).

Las extracciones de agua para el riego se han identificado como el principal impulsor del agotamiento de las aguas subterráneas en todo el mundo. Se ha estimado que en la década de 2050 existirá una gran oleada de extracciones de aguas subterráneas que ascenderá a 1,100 km³ año, lo que corresponde a un aumento del 39% sobre los niveles actuales (Ramos-Cruz *et al.*, 2018).

En el sector agrícola, el concepto de "eficiencia en el uso del agua" se utiliza a menudo para resaltar la relación entre el desarrollo del crecimiento de los cultivos y la cantidad de agua utilizada. También se puede definir a la eficiencia del uso del agua de la planta como la relación entre la acumulación de biomasa (expresada como asimilación de dióxido de carbono), la biomasa total del cultivo o el rendimiento del cultivo a la transpiración del cultivo (Mancosu *et al.*, 2015).

El manejo del riego debe enfocarse en el ahorro de agua, manteniendo el rendimiento y mejorando la calidad del fruto, debido a los cambios vegetativos que se producen en respuesta al estado hídrico (Battilani, 2012). La mayor necesidad para el desarrollo del riego es minimizar el uso del agua, se necesita un esfuerzo para la implementación de métodos de aplicación que minimicen la pérdida de agua por evaporación del suelo o la filtración de agua más allá de la profundidad de la zona de la raíz y para minimizar las pérdidas de agua de los sistemas de almacenamiento o entrega. Hoy en día, durante un período de cambios dramáticos e incertidumbre sobre los recursos hídricos, es necesario brindar cierto apoyo y estímulo a los agricultores para que pasen de sus prácticas tradicionales

de cultivo y riego de alta demanda de agua a sistemas y tecnologías modernos y de menor demanda (Chartzoulakisa y Bertaki, 2015).

El estrés por sequía es el factor limitante más importante en el crecimiento de la planta en regiones áridas y semi áridas (Dehkordi, 2016). La sequía es el estrés ambiental más importante que afecta negativamente el equilibrio ecológico, la productividad agrícola y el bienestar humano en una infinidad de formas en todo el mundo (Kumar y Singh, 2018). En áreas con escasez de agua la adopción del riego, las mejoras en la eficiencia y el desarrollo del riego, así como las tecnologías y técnicas de conservación del suelo y el agua parecen ser opciones de adaptación (Rosegrant *et al.*, 2009).

El principal uso agrícola del agua es para riego y su suministro está disminuyendo constantemente debido a la competencia con los sectores municipal e industrial. Por lo tanto, se necesita innovación tecnológica, gerencial, de políticas y gestión de recursos humanos para aumentar la eficiencia del uso del agua disponible (Chartzoulakisa y Bertaki, 2015).

Los efectos inducidos por el cambio global pueden tener un gran impacto en los recursos hídricos mundiales, especialmente en los agroecosistemas de regadío, que representan el 70% del uso antropogénico global del agua (Bernacchi y VanLoocke, 2015).

La disminución de los recursos hídricos junto con los crecientes impactos del calentamiento global y los cambios climáticos y las crecientes demandas de una población cada vez mayor hacen que la utilización efectiva de los recursos hídricos sea una necesidad. Las crecientes demandas de los sectores también agotan los recursos hídricos subterráneos, contaminan los ecosistemas hídricos y el desarrollo de nuevos recursos hídricos se está volviendo cada vez más caro cada día (Ayas, 2019).

El rápido crecimiento de la población implica una creciente demanda de tierras de cultivo; y agua de riego para satisfacer la demanda de la población. Mantener niveles apropiados de humedad del suelo es uno de los factores limitantes para proporcionar un crecimiento de plantas uniforme y adecuado, y altos rendimientos de producción y cultivos de mayor calidad (Escobosa *et al.*, 2014).

1.4 Hidrogeles

Los hidrogeles son polímeros reticulados con un grupo hidrofílico que tienen la capacidad de absorber grandes cantidades de agua sin disolverse. Son definidos como una red de polímero tridimensional ligeramente reticulada, generalmente compuesta de monómeros iónicos, cuya propiedad de interés es la capacidad de hincharse en presencia de fluidos acuosos o biológicos (Rajiv *et al.*, 2013; Milani *et al.*, 2017; Shanin *et al.*, 2017; Neethu *et al.*, 2018).

La capacidad de los hidrogeles para absorber el agua surge de los grupos funcionales hidrófilos unidos al esqueleto polimérico, mientras que su resistencia a la disolución surge de los enlaces cruzados entre las cadenas de red (Ahmed, 2015; Kalhapure *et al.*, 2016). El mecanismo por el cual los polímeros son capaces de absorber tanto volumen de soluciones acuosas no es solamente físico, sino que depende de la naturaleza química del polímero. Las fuerzas que contribuyen al hinchamiento de los hidrogeles son la energía libre de mezcla y la respuesta elástica del entrecruzamiento (Rojas *et al.*, 2006). Muchos materiales, tanto naturales como sintéticos, se ajustan a la definición de hidrogeles (Ahmed, 2015).

En el sentido real, el hidrogel es una molécula de polímero única, es decir, las cadenas de red en el gel que están conectadas entre sí para formar una molécula grande a escala macroscópica. Los hidrogeles agrícolas son polímeros sintéticos generalmente hechos de productos derivados del petróleo que absorben muchas veces su peso en agua (Neethu *et al.*, 2018). La capacidad de retención de agua e hinchazón de un *Super Absorbent Polymer* (SAP) polímero superabsorbente, puede explicarse mediante un mecanismo de múltiples pasos. El primer paso comprende la hidratación de grupos hidrófilos presentes en la red de polímeros con fuertes enlaces al agua. Los enlaces secundarios más débiles se forman con el agua por la interacción entre el agua y los grupos hidrófobos expuestos. Como siguiente paso, los enlaces cruzados físicos o químicos minimizan el efecto de las fuerzas osmóticas que conducirían a una dilución infinita de la red de polímeros, y por esta razón, la red retiene agua adicional (Milani *et al.*, 2017).

Los acondicionadores poliméricos del suelo se conocían desde la década de 1950. Estos polímeros fueron desarrollados para mejorar las propiedades físicas del suelo en vista de:

Aumentar su capacidad de retención de agua

Aumentar la eficiencia del uso del agua

Mejorar la permeabilidad del suelo y las tasas de infiltración

Reducción de la frecuencia de riego

Reducir la tendencia de compactación

Detener la erosión y la escorrentía de agua

Aumentar el rendimiento de la planta (especialmente en suelos sin estructura en áreas sujetas a sequía).

Las partículas de SAP pueden tomarse como "depósitos de agua en miniatura" en el suelo. El agua se eliminará de estos depósitos a la demanda de la raíz a través de la diferencia de presión osmótica. Los hidrogeles también actúan como un sistema de liberación controlada al favorecer la absorción de algunos elementos nutrientes, sujetándolos firmemente y retrasando su disolución, en consecuencia, la planta aún puede acceder a algunos de los fertilizantes, lo que da como resultado mejores tasas de crecimiento y rendimiento (Ekebafe *et al.*, 2011).

1.4.1 Mecanismo de absorción de agua de hidrogel

El hidrogel funciona como depósitos conservadores de agua alrededor en la zona de masa radicular de la planta (Rajiv *et al.*, 2013; Neethu *et al.*, 2018). Los grupos hidrófilos (acrilamida, ácido acrílico, acrilato, ácido carboxílico, etc.) de la cadena polimérica son responsables de la absorción de agua en hidrogeles, los grupos ácidos están unidos a la cadena principal del polímero. Cuando estos polímeros se ponen en agua, este último ingresa al sistema de hidrogel por ósmosis y los átomos de hidrógeno reaccionan y salen como iones positivos, esto deja iones negativos a lo largo de la cadena del polímero, por lo tanto, el hidrogel ahora tiene varias cargas negativas a lo largo de su longitud, estas cargas negativas se repelen entre sí, esto obliga a la cadena de polímero a desenrollarse y abrirse y también atraen moléculas de agua y las unen con enlaces de hidrógeno (Kalhapure *et al.*, 2016).

En contacto con agua, esta se desplaza hacia el interior de la partícula de hidrogel, dada la menor actividad de agua que allí se presenta; a medida que el agua se difunde, la partícula incrementa su tamaño y las cadenas poliméricas se mueven para acomodar las moléculas de agua, simultáneamente, la presencia de puntos de entrecruzamiento evita que las cadenas en movimiento se separen y por tanto se disuelvan en el agua (Barón-Cortés *et al.*, 2007). Las raíces de las plantas pueden crecer a través del tejido y absorber hasta el 95% del agua almacenada, también puede limitar la pérdida de agua del suelo y contribuir a la estabilización de las pendientes cubiertas de hierba (Oksińska *et al.*, 2016).

Los hidrogeles son compatibles con una amplia gama y tipo de suelos y, por lo tanto, tiene una tendencia general a aumentar el rendimiento de este y el rendimiento de la planta. La retención de agua de lluvia, la erosión del suelo por las escorrentías de aguas pluviales, especialmente en terrenos inclinados, pueden evitarse en gran medida (Neethu *et al.*, 2018). Puede recolectar, almacenar y luego liberar más agua de riego o agua de lluvia gradualmente para los requisitos del cultivo durante un período bastante largo entre aplicaciones de agua (Rajiv *et al.*, 2013).

Como se sabe el rendimiento del cultivo aumenta con la disponibilidad de agua en la zona de la raíz, hasta el nivel de saturación. El manejo sostenible del agua en la agricultura tiene como objetivo igualar la disponibilidad y las necesidades de agua en cantidad y calidad, en espacio y tiempo, a un costo razonable y con un impacto ambiental aceptable (Chartzoulakisa y Bertaki, 2015).

Los polímeros sintéticos juegan un papel importante en los usos agrícolas como materiales estructurales para crear un clima beneficioso para el crecimiento de las plantas, para la fumigación y el riego, en el transporte y el control de la distribución del agua. Sin embargo, el requisito principal en los polímeros utilizados en estas aplicaciones se refiere a sus propiedades físicas; tales como transmisión, estabilidad, permeabilidad o resistencia a la intemperie; como materiales inertes en lugar de como moléculas activas.

Los hidrogeles de SAP influyen potencialmente en la permeabilidad del suelo, la densidad, la estructura, la textura, la evaporación y las tasas de infiltración de agua a través de los suelos. En particular, los hidrogeles

reducen la frecuencia de riego y la tendencia a la compactación, detienen la erosión y la escorrentía del agua, y aumentan la aireación del suelo y la actividad microbiana (Ekebafé *et al.*, 2011).

El rendimiento del hidrogel está determinado por la química y las condiciones de formación del polímero hidrofílico y la composición química de la solución del suelo o el agua de riego. Los polímeros totalmente sintéticos están químicamente reticulados para evitar que se disuelvan en solución (Abedi-Koupai y Asadkazemi, 2006).

La capacidad de hinchamiento se determina mediante el método gravimétrico, inicialmente el hidrogel seco se pesa y se sumerge en un exceso de agua destilada o disolvente de interés. La cantidad de agua absorbida está determinada por la diferencia de peso (Serna y Guancha, 2017). En pruebas de hinchamiento en agua destilada mostraron que el SAP a base de celulosa puede absorber agua hasta 74 veces su propio peso (Cannazza *et al.*, 2014). En tanto cuanto se utiliza agua en diferentes condiciones: en agua destilada la absorción de agua es máxima (180 g agua/g polímero) y mínima cuando se colocan en agua salada (130 g agua/g polímero) debido a que los iones de las sales dificultan el estiramiento de las cadenas de polímero (Gómez y Cañamero, 2011). Un poliacrilato reticulado, aumenta el contenido de humedad un 66 % (Chen *et al.*, 2016).

1.4.1 Características de los hidrogeles agrícolas

La aplicación de polímeros superabsorbentes (SAP) con el fin de mejorar la retención de agua en el suelo representa una técnica importante en la nanoingeniería de conservación del agua para la agricultura (Renkuan *et al.*, 2016). Los hidrogeles agrícolas son polímeros que contienen un esqueleto de celulosa, estos pueden funcionar bien a altas temperaturas (40–50°C) y absorber hasta 400 veces su peso seco en agua y lo liberaran gradualmente de acuerdo con las necesidades de la planta. Debido a su pH neutro, no afectan la disponibilidad de nutrientes, la composición química del suelo, o la acción de otros agroquímicos (Kalhapure *et al.*, 2016). La cadena principal del polímero en SAP es hidrofílica, es decir afín al agua porque contiene grupos de ácido carboxílico (-COOH) que atrae moléculas de agua. Cuando

se agrega agua a SAP hay una interacción polímero/solvente; hidratación y la formación de enlaces de hidrógeno (Rajiv *et al.*, 2013).

Los hidrogeles mejoran las propiedades físicas de los suelos (por ejemplo, porosidad, densidad aparente, capacidad de retención de agua, permeabilidad del suelo, tasa de infiltración, etc.)(Kalhapure *et al.*, 2016). Son de especial interés por su uso en suelos arenosos ya que la capacidad de retención de agua y nutrientes puede mejorar aumentando el rendimiento (Rajiv *et al.*, 2013). En este tipo de suelo la productividad de la planta también se limita por las propiedades físicas y químicas adversas del suelo, como las bajas tasas de infiltración, así como la baja retención de agua y la baja capacidad de intercambio de cationes (Pattanaaik *et al.*, 2015a).

Los SAP comunes son generalmente materiales higroscópicos similares al azúcar blanco. En la agricultura son ampliamente utilizados para mejorar la eficiencia del riego; los materiales de SAP tienen sistemas de entrega inteligentes que pueden ayudar a la industria agrícola a combatir virus y otros patógenos de cultivos, se utilizaron polímeros funcionalizados para aumentar la eficiencia de los pesticidas y herbicidas (Rajiv *et al.*, 2013).

La cantidad de agua total requerida para el riego se reduce en un 15 a 50% cuando se adopta el acondicionamiento del suelo por SAP en diferentes proporciones (Rajiv *et al.*, 2013).

Propiedades ópticas: El polímero, una vez hidratado, tiene prácticamente el mismo índice de refracción que el agua. Tomando una de las bolitas hinchadas y cortándola por la mitad podemos observar que tiene las características de una lente convergente, la bolita actúa como una lupa (Gómez y Cañamero, 2011).

El agua que pasa de un cubo de hidrogel hinchado al sustrato circundante no es una función del gradiente de humedad entre el cubo y el sustrato, sino más bien una función de la tensión ejercida sobre el cubo hidratado. Esta tensión está influenciada por el potencial de matriz del sustrato y la conductividad entre el cubo de hidrogel y el sustrato. Si se rompe la conductividad entre el cubo y el sustrato, cesaría el movimiento del agua. Esta interrupción significaría que el agua extraída por las raíces del sustrato circundante no necesariamente sería reemplazada por agua de los cubos de hidrogel (Fonteno y Bilderback, 1993).

Cuando sus alrededores comienzan a secarse, el hidrogel dispensa gradualmente hasta el 95% de su agua almacenada. Cuando se expone nuevamente al agua, se rehidratará y repetirá el proceso de almacenamiento de agua, este proceso puede durar de 2 hasta 5 años, momento en el que el hidrogel biodegradable se descompone (Kalhapure *et al.*, 2016).

Características generales de los polímeros súper absorbentes según Neethu *et al.* (2018)

1. Exhibe absorción máxima a temperaturas (40-50 °C) características de suelos semiáridos y áridos.
2. Absorbe el agua 400 veces su peso seco y libera gradualmente el mismo.
3. Estable en el suelo por un período mínimo de un año.
4. Tasas bajas de aplicación al suelo: 1-2 kg ha⁻¹ para cultivos hortícolas de vivero; 2.5-5 kg/ha para cultivos de campo.
5. Reduce la lixiviación de herbicidas y fertilizantes.
6. Mejora las propiedades físicas de los suelos.
7. Mejora la germinación de semillas y la tasa de emergencia de plántulas.
8. Mejora el crecimiento y la densidad de la raíz.
9. Reduce los requisitos de riego y fertirrigación de los cultivos.
10. Promueve la floración temprana y el fructificación.
11. Retrasa la aparición del punto de marchitez permanente.
12. El extenso crecimiento de las raíces resulta en una mayor eficiencia en el uso de agua y nutrientes

1.4.2 Uso de los hidrogeles

Sus usos principales son en la agricultura y jardinería, aplicaciones medioambientales, en la industria alimentaria, y en medicina (Gómez y Cañamero, 2011).

Biocidas y herbicidas poliméricos

Recientemente ha surgido una nueva técnica para las formulaciones de liberación controlada diseñadas para evitar o reducir los posibles efectos secundarios que acompañan el uso de agentes biológicamente activos. El propósito de esta técnica incluye; para proteger el suministro del agente,

permitir la liberación automática del agente al objetivo a velocidades controladas y mantener su concentración dentro de los límites óptimos durante un período de tiempo específico, produciendo así una gran especificidad y persistencia. Existen dos enfoques diferentes para combinar los agentes biológicos con los materiales poliméricos. Ya sea por combinación física (encapsulación o dispersión heterogénea) para actuar como un dispositivo de control de velocidad, o por combinación química para actuar como portador del agente (Ekebafé *et al.*, 2011). La microencapsulación juega un papel importante en la producción de materiales más seguros para el medio ambiente.

El biocida polimérico tiene muchas ventajas y sus beneficios potenciales incluyen: permite que se usen cantidades menores que los biocidas convencionales, ya que libera la cantidad requerida de agente activo durante un período prolongado, el número de aplicaciones se reduce debido a un período prolongado de actividad por un solo aplicación (Rudzinski *et al.*, 2002), elimina el tiempo y el costo de las aplicaciones repetidas porque se necesitan menos materiales activos, la reducción de la toxicidad, elimina la necesidad de una distribución generalizada de grandes cantidades de niveles de biocidas en el entorno, la reducción de la evaporación y la degradación por las fuerzas ambientales (Ekebafé *et al.*, 2011; Guilherme *et al.*, 2015).

1.4.3 Orígenes

Según Zohuriaan-Mehr y Kabiri (2008) la síntesis del primer polímero absorbente de agua se remonta a 1938 cuando el ácido acrílico (AA) y el divinilbenceno se polimerizaron térmicamente en un medio acuoso. A fines de la década de 1950, apareció la primera generación de hidrogeles. Estos hidrogeles se basaron principalmente en metacrilato de hidroxialquilo y monómeros relacionados con una capacidad de hinchamiento de hasta 40-50%. Se utilizaron en el desarrollo de lentes de contacto que han revolucionado la oftalmología.

El primer SAP comercial se produjo mediante hidrólisis alcalina de almidón-injerto-poliacrilonitrilo (Mancosu *et al.*). El producto hidrolizado (HSPAN) se desarrolló en la década de 1970 en el Laboratorio de Investigación Regional

del Norte del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Los gastos y la desventaja estructural inherente (falta de resistencia suficiente del gel) de este producto se toman como los principales factores de su derrota temprana en el mercado.

La producción comercial de SAP comenzó en Japón en 1978 para su uso en toallas femeninas. Otros desarrollos llevaron a que los materiales de SAP se empleen en pañales para bebés en Alemania y Francia en 1980. En 1983, los pañales de bajo contenido en pelusa (que contenían 4-5 g de SAP) se comercializaron en Japón. Esto fue seguido en breve por la introducción de pañales superabsorbentes más delgados en otros países asiáticos, Estados Unidos y Europa. Debido a la efectividad de los SAP, los pañales se volvieron más delgados, ya que el polímero reemplazó principalmente la pelusa de celulosa más voluminosa que no podía retener mucho líquido bajo presión. Como resultado, el SAP causó una gran revolución en las industrias de atención médica personal en poco más de diez años. A finales de 1990, la producción mundial de resinas SAP era de más de un millón de toneladas. Los mayores fabricantes de SAP son Amcol (Chemdal), Stockhausen, Hoechst, Sumitomo, Sanyo, Colon, Nalco y SNF Floerger Companies.

1.4.4 Tipos y componentes

Clasificación de productos de hidrogel según Ahmed (2015)

Los productos de hidrogel se pueden clasificar en diferentes bases como se detalla a continuación:

- Clasificación basada en la fuente: Los hidrogeles pueden clasificarse en dos grupos según su origen natural o sintético.
- Clasificación según composición polimérica.

Zohuriaan-Mehr y Kabiri (2008) cita dos clasificaciones más.

- Clasificación según la carga eléctrica de la red: los hidrogeles pueden clasificarse en cuatro grupos en función de la presencia o ausencia de carga eléctrica ubicada en las cadenas reticuladas:

(a) No iónico (neutral).

(b) Iónico (incluso anicónico o catiónico).

(c) Electrolito anfótero (anfólítico) que contiene grupos ácidos y básicos.

(d) Zwitteriónico (polybetaines) que contienen grupos anicónicos y catiónicos en cada unidad estructural de repetición.

- Clasificación según su tipo de unidad monomérica utilizada en su estructura química, por lo que los SAP más convencionales se encuentran en una de las siguientes categorías:

(a) poliacrilatos y poliacrilamidas reticulados

(b) celulosa-poliacrilonitrilo hidrolizado (PAN) o almidón-PAN hidrolizados.

(c) copolímeros reticulados de anhídrido maleico (Zohuriaan-Mehr y Kabiri, 2008).

Técnicas de síntesis

Desde el punto de vista de los recursos materiales, los SAP (polímeros superabsorbentes) también se pueden dividir en macromoléculas naturales, polímeros semisintéticos y polímeros sintéticos. Actualmente existen muchos tipos de SAP en el mercado. En su mayoría, son copolímeros ligeramente reticulados de acrilato y ácido acrílico, y polímeros de ácido de almidón-acrílico injertados preparados por suspensión inversa, polimerización en emulsión y polimerización en solución.

Se han descrito las técnicas de polimerización según Kiatkamjornwong (2007):

- Polimerización a granel.
- Solución de polimerización/reticulación.
- Polimerización en suspensión o polimerización en suspensión inversa.
- Polimerización por irradiación.

1.4.5. Usos en la agricultura

Los ecosistemas agrícolas dependen en gran medida de la disponibilidad de precipitaciones o riego para mantener la productividad y parecen ser cada vez más sensibles a los cambios climáticos (Bernacchi y VanLoocke, 2015). El agua del suelo afecta el crecimiento de las plantas directamente a través de su efecto de control sobre el estado del agua de la planta. (Chartzoulakisa y Bertaki, 2015). Por lo que hoy la aplicación de estrategias eficientes del manejo del agua es un elemento clave para aumentar la productividad del agua (Mancosu *et al.*, 2015).

Los hidrogeles se han propuesto ampliamente para fines hortícolas durante los últimos 40 años con la idea básica de utilizar las propiedades de hinchamiento y liberación de agua para mejorar la disponibilidad de agua para las plantas. (Montesano *et al.*, 2015). Los polímeros absorbentes de agua ayudan a mantener la humedad del suelo reteniendo el agua en las partículas de suelo y la mayor parte del agua está disponible para la planta (Mandal *et al.*, 2015). Una mayor disponibilidad de agua ayuda a evitar el estrés hídrico durante períodos más largos de escasez de agua. Durante la fase de liberación de agua del hidrogel, se creará un volumen de poro libre dentro del suelo, que ofrece espacio adicional para el crecimiento de las raíces, la infiltración y el almacenamiento de aire y agua (Pattanaaik *et al.*, 2015b).

El problema del uso ineficiente de la lluvia y el agua de riego por los cultivos, es más importante en las regiones semiáridas y áridas, donde la escasez de agua se experimenta con frecuencia y el agua es el principal factor limitante para el crecimiento y el rendimiento de los cultivos. En estas regiones del mundo, se está llevando a cabo una investigación intensiva sobre la gestión del agua y el uso de (SAP) (Islam *et al.*, 2011). Ya que se piensa puede aumentar efectivamente la eficiencia del uso de agua y fertilizantes en los cultivos (Kassim *et al.*, 2017).

El aumento de la eficiencia del agua podría ser la solución para las necesidades alimentarias que acompañan el crecimiento demográfico proyectado, ya que la disponibilidad de agua para la agricultura es una condición esencial para lograr rendimientos satisfactorios y rentables, tanto en términos de rendimiento unitario como de calidad (Mancosu *et al.*, 2015). Los acondicionadores de suelo, tanto naturales como sintéticos, contribuyen significativamente a proporcionar un depósito de agua del suelo a las plantas a demanda en las capas superiores del suelo donde normalmente se desarrollan los sistemas de raíces (Yangyuoru *et al.*, 2006).

En aplicaciones agrícolas, los gránulos de SAP se mezclan con el suelo en cantidades dadas. Después de regar, los gránulos absorben el agua mediante hinchazón y luego la liberan lentamente a través de un mecanismo de difusión, a medida que el suelo se seca. De esta manera, el agua de riego no se pierde a través del drenaje o la evaporación, mientras se

suministra eficientemente a las raíces de las plantas cuando es necesario. Además, los gránulos de SAP aumentan su tamaño al hincharse, mejorando así la porosidad del suelo y proporcionando una mejor oxigenación a las raíces (Cannazza *et al.*, 2014).

Una ventaja adicional de los SAP en la agricultura es que pueden cargarse con sustancias nutricionales y fitofarmacéuticas, que luego se liberan gradualmente a las plantas, los sistemas de liberación controlada de nutrientes son un enfoque clave para reducir las pérdidas de nutrientes por lixiviación después de la aplicación, minimizando los costos económicos asociados y los problemas ambientales (Guilherme *et al.*, 2015). La principal ventaja de los hidrogeles como acondicionadores de suelo es que pueden controlar la liberación de agua almacenada a medida que se seca el suelo, manteniendo la humedad del suelo durante un tiempo relativamente largo. Además, la presencia de hidrogel aumenta la porosidad del suelo lo que proporciona una mejor oxigenación a las raíces de las plantas (Guilherme *et al.*, 2015).

La retención de agua en los suelos incrementa dependiendo de las características de los hidrogeles (Barón-Cortés *et al.*, 2007). Un estudio demostró cuantitativamente que la hinchazón del hidrogel afecta directamente la estabilidad microestructural del suelo (Buchmann y Schaumann, 2017).

Hay dos formas de evaluar la disponibilidad de agua del suelo para el crecimiento de las plantas: midiendo el contenido de agua del suelo y midiendo qué tan fuerte se retiene el agua en el suelo (potencial de agua del suelo) (Chartzoulakisa y Bertaki, 2015).

Algunos métodos de aplicación según Kalhapure *et al.* (2016)

- Para cultivos de campo: Prepare una mezcla de hidrogel y tierra seca en una proporción de 1: 10 y aplique junto con las semillas / fertilizantes o en los surcos abiertos antes de sembrar. Para mejores resultados, el hidrogel debe estar cerca de las semillas.
- En la cama de vivero para trasplantes: aplique 2 g/m² (o según la tasa recomendada por la empresa que comercialice el producto) de la mezcla de hidrogel en la cama de vivero uniformemente en las 2

pulgadas superiores de la cama de vivero. En cultivo en maceta, mezcle 3–5 g/kg de tierra antes de plantar.

- Durante el trasplante: mezcle completamente 2 g (o según la tasa recomendada por la empresa que comercialice el producto) de hidrogel por litro de agua para preparar una solución de flujo libre; déjelo reposar durante media hora. Sumerja las raíces de la planta en la solución y luego trasplante en el campo (Kalhapure *et al.*, 2016).

1.5 Acrilato de potasio

Identificación del producto utilizado en el experimento

Nombre del producto: Acrilato de Potasio

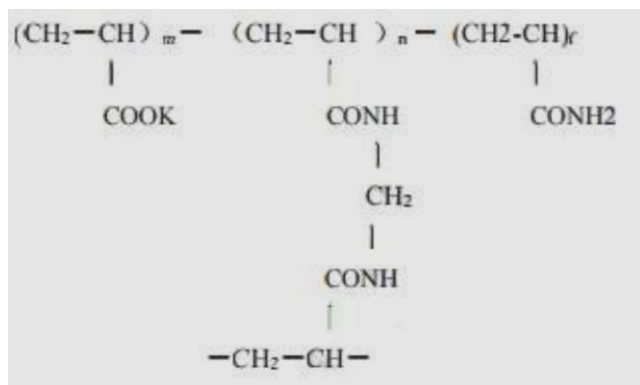
Empresa: Soluciones Agropecuarias De La Laguna SAS de CV.

Telefono: 87-14-63-01-74

Domicilio: Rio Mayo #1065 Col. Las Magdalenas. Torreón, Coahuila.

Identificación del Producto: superabsorbentes de poliacrilamida.

1.5.1 Formula química



1.5.2 Propiedades físicas y químicas

Forma: Granulado sólido

Color: Gránulo de cristal blanco

Olor: Ninguno

Punto de ebullición: Ninguno

Punto de fusión: No aplicable

Presión de vapor: Ninguno

Densidad de vapor: Ninguno

Solubilidad en agua: Insoluble

PH: Neutral

Viscosidad (mPa.s): No aplicable

- Ahorro de agua riego por inundación hasta un 90%.
- Riego por aspersion hasta un 50%.

- Riego por goteo hasta un 35%.

1.5.3 Información ecológica

Eco toxicidad

En el suelo: No son conocidas o previsibles, bajo condiciones normales de uso. En el agua: Es poco probable debido a su baja solubilidad.

En el aire: No es previsible, se encontrará siempre en la raíz

- Persistencia/degradabilidad: No es fácilmente degradable, <10% después de 28 días permanecerá en el suelo incrustado por las sales del agua.

1.6 Evaluación de los hidrogeles en la agricultura

Cannazza *et al.* (2014) encontraron que la adición de SAP al suelo retrasa la evaporación del agua, haciendo que el agua esté disponible para las plantas durante un período de tiempo más largo. Los experimentos realizados en condiciones que simulan cultivos en campo abierto mostraron que, a pesar de haber reducido la cantidad de agua suministrada en un 50 % para los suelos modificados con SAP, las plantas crecieron regularmente.

Al estudiarse la aplicación de altos niveles de adición del SAP Superab A200 en suelo franco arenoso se encontró que mejoró el contenido de agua disponible aproximadamente 2.3 veces en comparación con el control. También hubo respuestas marcadas en el número de días hasta el punto de marchitez permanente como resultado de la aplicación del polímero. Sin embargo, las tasas de aplicación más altas de polímero no podrían justificarse en la práctica, similar a los resultados encontrados en la presente investigación (Cuadro 5). La aplicación de 4 g/kg de Superab A200 tuvo un rendimiento adecuado para *Cupressus arizonica* y redujo el agua requerida al menos 1/3 del control (Abedi-Koupai y Asadkazemi, 2006).

El suelo acondicionado con un producto a base del copolímero de acrilamida y acrilato de potasio a dosis de 25 kg ha⁻¹ reveló diferencias significativas en la supervivencia de las plantas de lechuga. Se muestra un incremento en el contenido de humedad de los suelos tratados 13.6 (50 kg/ha) y 9.6 % (25 kg/ha) con respecto al testigo (Andrada y Di Barbaro, 2018).

Baran *et al.* (2015) realizaron un estudio con el hidrogel de Agroaquagel® (copolímero acrílico/acrilamida) y encontraron que mejoró las propiedades biofísicas y biológicas de las áreas improductivas: suelos y relaves

químicamente degradados. Todas las dosis del hidrogel mezcladas con tierra aumentaron en un 32-69 % su capacidad máxima de retención de agua. El suelo y los relaves enriquecidos con hidrogel revelaron una menor tasa de secado, lo que limita la pérdida de agua disponible para las plantas. En especies forestales la mayor retención de agua en el suelo por el acondicionamiento con hidrogeles permite sobrevivir a las especies cultivadas ante condiciones de sequía. El primer indicio de marchitamiento se retrasa hasta en un 400% para especies forestales y para sequías prolongadas la cantidad de plantas marchitas desciende en un 250% (Barón-Cortés *et al.*, 2007).

Barros *et al.* (2017) reportan que el uso de la aplicación de SAP en semillas de sorgo mejora el desarrollo vegetativo de las plántulas y la tasa de supervivencia bajo déficit hídrico.

En un estudio realizado por Di Barbaro *et al.* (2013) el cual consistió en la inoculación de semillas de lechuga con la bacteria *Azospirillum brasilense* en acrilato de potasio, encontraron que el acrilato de potasio protege a las células bacterianas, conservando e incluso mejorando su viabilidad. Los SAP no tienen efectos negativos en las colonias microbianas del suelo e incluso podrían aumentarla, estos polímeros son un tripolímero de acrilamida, ácido acrílico y acrilato de potasio (Khodadadi, 2018).

Escobosa *et al.* (2014) realizaron pruebas de laboratorio que consistieron en la aplicación de 4 tratamientos: 0, 5, 10 y 15 partes por millón (ppm) de poliacrilato de potasio con tres repeticiones. La adición de 10 y 15 ppm de poliacrilato de potasio fueron estadísticamente diferentes ($P < 0.05$) en el porcentaje de saturación a una profundidad de 0-30 sin afectar el pH y la conductividad eléctrica.

Geesing y Schmidhalter (2004) observaron aumentos considerables en la capacidad de retención de agua con la adición de polímero ≥ 3 g/l, en particular con la franja arenosa. El efecto del polímero en la capacidad de retención de agua fue mayor hasta -1000 hPa que, a potenciales matriciales de suelo más pequeños, lo que indica que el agua retenida por el polímero está fácilmente disponible para la planta.

Kassim *et al.* (2017) en un experimento realizado en el cultivo de banano Grand Nain detectaron que tanto el régimen de polímeros como el de agua

afectaron significativamente el crecimiento vegetativo de las plantas. La aplicación de polímero con 1.5 y 1.0 kg/planta/año (dosis más alta utilizada) dio el valor más alto en la eficiencia del uso del agua con 5.2 y 4.8 kg/m³ en comparación con todos los otros tratamientos. La profundidad de aplicación y la densidad aparente del suelo son algunos de los parámetros básicos que determinan el alcance de la limitación de la absorción de agua por el SAP en el suelo (Lejcus *et al.*, 2018).

La aplicación de SAP favorece diferentes actividades fisiológicas (concentración intercelular de dióxido de carbono, fotosíntesis y potencial hídrico foliar) y aumentó la capacidad de supervivencia de la planta de maíz bajo estrés por sequía (Islam *et al.*, 2011).

Mediante el uso de súper absorbente, la cantidad de aumento de rendimiento de la uva se ha incrementado en un 48.45%. Se obtuvo un mayor crecimiento vegetativo, al proporcionar condiciones mejoradas, aumento de la fotosíntesis al producir una mayor cobertura verde, se produjo un mayor número de racimos en el arbusto y aumentaron el número individual de uva por racimo, además de aumentar la longitud de la uva individual (Namvar *et al.*, 2014).

Nariman *et al.* (2013) encontraron que el efecto de la aplicación del súper absorbente y el manejo del riego sobre el rendimiento de semillas de maní fue significativo a un nivel de probabilidad del 1 % con 2,285 kg ha⁻¹ a partir del manejo de riego a intervalos de 7 días (interacción manejo de riego-intervalo de riego), el rendimiento de semilla más bajo del tratamiento de control (sin aplicación SAP) con 1,556 kg ha⁻¹.

Pattanaaik *et al.* (2015b) encontraron que el hidrogel Stockosorb® retiene el agua considerablemente durante más tiempo que el control. Sin embargo, el acolchado puede aumentar la eficiencia del Stockosorb® en suelo poroso y muy arenoso.

Se realizó un estudio utilizando un hidrogel para evaluar la germinación de semillas de arroz, el resultado mostró que se germinaron más semillas (185.56) en parcelas tratadas con hidrogel en comparación con parcelas no tratadas (158.01). Hubo una diferencia significativa en el número de granos por panícula de arroz.

El máximo rendimiento de grano de arroz (2.46 tonha^{-1}) en comparación con la ausencia de hidrogel (2.25 tonha^{-1}) (Rehman *et al.*, 2011).

Los hidrogeles mejoran el suministro de agua a la planta, incrementando la germinación de las semillas de tomate en comparación con el control. Además, la presencia del hidrogel, parece disminuir el efecto negativo de la alta salinidad del suelo sobre el crecimiento de las plántulas (Rojas *et al.*, 2006).

Saifuldeen (2015) encontraron que el rendimiento de grano de trigo aumentó con cantidades crecientes de Sky Gel (copolímero reticulado de ácido acrílico y ácido acrílico de sodio). La mayor producción de 4.83 tonha^{-1} se obtuvo con la aplicación de Sky Gel al 12 % y la menor producción de grano de trigo en las plantas control fue de 3.88 tonha^{-1} .

Xu *et al.* (2018) estudiaron un hidrogel en plantas ornamentales, sus resultados indicaron que se retuvo una mayor humedad en sustratos con polímeros hidrófilos en comparación con la del sustrato de control. La adición de 1.0 kg/m^3 de polímero hidrofílico al sustrato aumentó el número de inflorescencias y dio como resultado un buen crecimiento y calidad ornamental tanto durante la sequía como en las estaciones lluviosas

Ortega-Torres *et al.* (2020) evaluaron la absorción de nitrógeno utilizando acrilato de potasio, sus resultados mostraron que el tratamiento con 50% de Acrilato de Potasio y 50 % de Fibra de Coco y el tratamiento con 25 % de AP y 75 % de FC presentaron de 580 a 615 ppm, respectivamente. los niveles de absorción en sustratos para N aceptable 40-99 ppm, óptimo 100-199 ppm. Estos resultados, fueron 5 veces más absorción de N, esto permitió tener un mejor manejo de los nutrientes, disminuyendo los riesgos de las pérdidas por lixiviación a causa de los frecuentes e intensos riegos en hidroponía.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Localización

El trabajo experimental se llevó a cabo en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro unidad Laguna (UAAAN-UL), en la ciudad de Torreón Coahuila México, la cual está ubicada en una longitud oeste de 101° 40' y 104° 45' y los paralelos 25° 05' y 26° 54' de latitud norte.

2.2 El invernadero

El invernadero cuenta con un área de 200 m², cubierta plástica, piso de grava, sistema de enfriamiento automático, pared húmeda y dos extractores.

2.3 Siembra

La siembra se realizó en charolas de 200 cavidades, el sustrato utilizado fue peat moss humedecido hasta capacidad de campo.

2.4 Tratamientos

El diseño de tratamientos utilizado fue trifactorial, los factores fueron:

- Factor A: sustratos

A1= Arena

A2= Mezcla (50 % arena-40 % composta-10 % perlita base volumen).

- Factor B: acrilato de potasio

B1=testigo, sin acrilato de potasio.

B2=3 g de acrilato de potasio/l sustrato.

B3=6 g de acrilato de potasio/l sustrato.

- Factor C: variedades

C1= Aquiles

C2= Moctezuma

2.4.1 Prueba preliminar (acrilato de potasio)

Antes de establecer el experimento en campo se realizó una prueba para conocer la capacidad de retención de agua del acrilato de potasio. Para esta prueba se utilizaron tres repeticiones de un gramo de acrilato.

Primero se llenaron con agua tres probetas con capacidad de 250 ml, posteriormente se les agregaron un gramo de acrilato de potasio previamente pesados a cada probeta.

Se dejaron las muestras por un periodo de una hora, después de ese tiempo se midió la cantidad de agua retenida. Para ello se separó el acrilato hidratado del agua sobrante en las probetas, la cantidad de agua retenida fue la diferencia entre el agua agregada a las probetas al inicio de la prueba (250 ml) y el agua que no absorbió el acrilato de potasio después de una hora.

En base a nuestros resultados, un gramo de acrilato de potasio absorbe en promedio 72 ml de agua, este dato difiere en un 28 % a lo reportado por Rivera-Fernández y Mesías-Gallo (2018) los cuales indican que cada gramo de hidrogel absorbe 100 ml de agua. Estos mismos reportan que el hidrogel se comporta diferente dependiendo de la textura del suelo. En suelos de características arenosa aumenta un 14.7 % la humedad, en suelo con textura limosa 17.4 % y en suelos pesados o arcillosos un 14.5 %, este fenómeno no se observa cuando el suelo está saturado o en capacidad de campo.

2.5 Trasplante

Previo al trasplante se saturaron las macetas con cinco litros de agua para tener una buena humedad en el sustrato e hidratar el hidrogel; cada maceta tenía 12 litros de sustrato. Una vez drenada el agua de los sustratos el trasplante se efectuó de forma manual.

2.6 Riego

Los riegos se llevaron a cabo diariamente (dos riegos por día). La cantidad de agua que se incorporó por maceta se calculó en base al peso inicial de cada maceta a capacidad de campo (Bernacchi y VanLooche) en cada uno de los tratamientos.

Para esta actividad se utilizó una báscula con capacidad de 100 kilogramos (EQB-100/200) marca Torrey®. Diariamente se pesaban cuatro repeticiones por tratamiento, de estos tratamientos se sacaba el peso promedio y la diferencia entre el peso de las macetas a CC y el peso promedio por tratamiento (antes de regar) fue la cantidad de agua que se agregó por tratamiento. Los riegos se llevaron a cabo de manera manual midiendo con una probeta graduada la cantidad de agua a aplicar en cada tratamiento.

2.7 Labores culturales

- Tutorado: una vez que la planta alcanzó una altura de 30 centímetros se colocó una rafia de manera vertical para dirigir y soportar el peso de la planta.
- Desbrote: esta práctica se realizó cuando los brotes tenían aproximadamente cinco centímetros de largo.
- Poda de hojas: esta actividad se realizó únicamente en hojas viejas o si la planta presenta un exceso de las mismas.

2.8 Cosecha

Se programó en relación a la maduración de los frutos, pero en base a la experiencia se puede cosechar cada tercer día.

2.9 Diseño Experimental

El diseño experimental utilizado fue bloques al azar con 12 tratamientos y cuatro repeticiones. En cada repetición se utilizaron cuatro plantas, dando un total de 16 plantas por tratamiento y 192 plantas en todo el experimento.

Los resultados obtenidos fueron analizados mediante el análisis de varianza y los promedios se compararon mediante la prueba de la diferencia mínima significativa (DMS_{.05}).

2.10 Variables a evaluar

- Fenología (altura y grosor del tallo), temperatura y humedad relativa.
- Calidad y rendimiento.
- Agua.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el cuadro 1 se presentan los factores estudiados sus interacciones y la significancia y no significancia de cada uno de ellos. Se presentarán resultados y discusiones únicamente en las variables cuyos factores fueron significativos. Los análisis de varianza de cada una de las variables se encuentran en el apartado del apéndice.

Cuadro 1. Resultados de los análisis de varianza para los factores estudiados, acrilato, sustratos y variedades en las diferentes variables estudiadas. UAAAN-UL 2021.

Variables	FACTORES						
	Acrilato	Sustrato	Variedad	Acril * Sust	Acril * Var	Sust * Var	A*S*V
G. Brix	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
D. polar	**	**	NS	**	NS	NS	NS
D. ecuatorial	**	*	NS	*	NS	NS	NS
N. lóculos	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
G. pulpa	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Rend ton/ha	**	**	NS	**	NS	NS	NS

* = significativo <0.05, ** = Altamente significativo <0.01 y NS = No hay significancia ≥ 0.05 .

Grados = G, Diámetro = D, Número = N, Grosor = G, Acrilato (A) = Acril, Sustrato (S) = Sust, Variedad(V) = Var.

3.1 Fenología (crecimiento y grosor del tallo), temperatura y humedad relativa

3.1.1 Crecimiento

La dinámica de crecimiento de las plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en los tratamientos evaluados se ajustó a técnicas de regresión lineal, siendo la variable dependiente (y) crecimiento en cm y la variable independiente (x) días después del trasplante (DDT). De acuerdo con las ecuaciones de regresión obtenidas (Cuadro 2) el ajuste lineal para todos los tratamientos fue aceptable ya que el R^2 fluctuó de 91 a 98 % en la variable crecimiento.

El tratamiento sin acrilato obtuvo el mayor crecimiento. Diferente a lo reportado por Islam *et al.* (2011) quienes realizaron una investigación en el cultivo de maíz y encontraron que la altura de la planta bajo diferentes niveles de riego aumentó en un 11.3 % con la adición de un polímero superabsorbente, al igual que Abobatta y Khalifa (2019) los cuales

reportaron que la adición de hidrogel al cultivo de naranja en un suelo arenoso mejoró la altura de la planta, circunferencia y el número de hojas/planta. Además, aumentó el rendimiento total, el peso de la fruta y la calidad de la fruta.

3.1.2 Grosor del tallo

La dinámica de grosor del tallo de las plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*L.) en los tratamientos evaluados se ajustó a técnicas de regresión lineal, siendo la variable dependiente (y) grosor del tallo en mm y la variable independiente (x) días después del trasplante (DDT). De acuerdo con las ecuaciones de regresión obtenidas (Cuadro 2) el ajuste lineal para los tratamientos 1, 2, 3, 4, 7, 8, 10, 11, y 12 no fue aceptable ya que el R^2 fluctuó de 21 a 66 % en cambio para los tratamientos 5, 6, y 9 si fue aceptable ya que la R^2 fluctuó de 76 a 78 %.

Cuadro 2. Ecuaciones de regresión para crecimiento y grosor del tallo en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en invernadero. UAAAN-UL, 2021.

Acrilato (g)	Sustrato	Variedad	Crecimiento		Grosor de tallo	
			Ecuación ^y	r ²	Ecuación ^y	r ²
0	Arena	Aquiles	Y=3.2378x -42.915	0.91	y=0.0352x + 5.031	0.21
0	Mezcla	Moctezuma	Y=3.3019x -42.259	0.95	y=0.0579x + 5.1312	0.38
0	Arena	Aquiles	Y=3.8006x -41.393	0.96	Y=0.0873x + 2.7716	0.62
0	Mezcla	Moctezuma	Y=3.2511x -33.542	0.97	y=0.1018x + 2.6661	0.66
3	Arena	Aquiles	Y=2.9396x -30.002	0.93	y=0.1169x + 2.2327	0.78
3	Mezcla	Moctezuma	Y=3.432x -36.294	0.98	y=0.0839x + 3.0117	0.72
3	Arena	Aquiles	y=3.2466x -41.135	0.97	y=0.0581x + 4.6206	0.39
3	Mezcla	Moctezuma	Y=3.467x -50.189	0.96	y=0.0631x + 3.9908	0.59
6	Arena	Aquiles	y=3.5403x -37.456	0.96	y=0.1033x + 2.8959	0.77
6	Mezcla	Moctezuma	y=3.5739x -43.823	0.98	y=0.0624x + 3.4878	0.66
6	Arena	Aquiles	y=2.9127x -33.403	0.95	y=0.0609x + 4.2457	0.54
6	Mezcla	Moctezuma	y=3.3779x -44.872	0.96	y=0.0565x + 4.4789	0.48

3.1.3 Temperatura

A continuación, en las siguientes figuras se muestra el registro de temperatura durante la evaluación del experimento en tomate (*Solanum lycopersicum* L.)

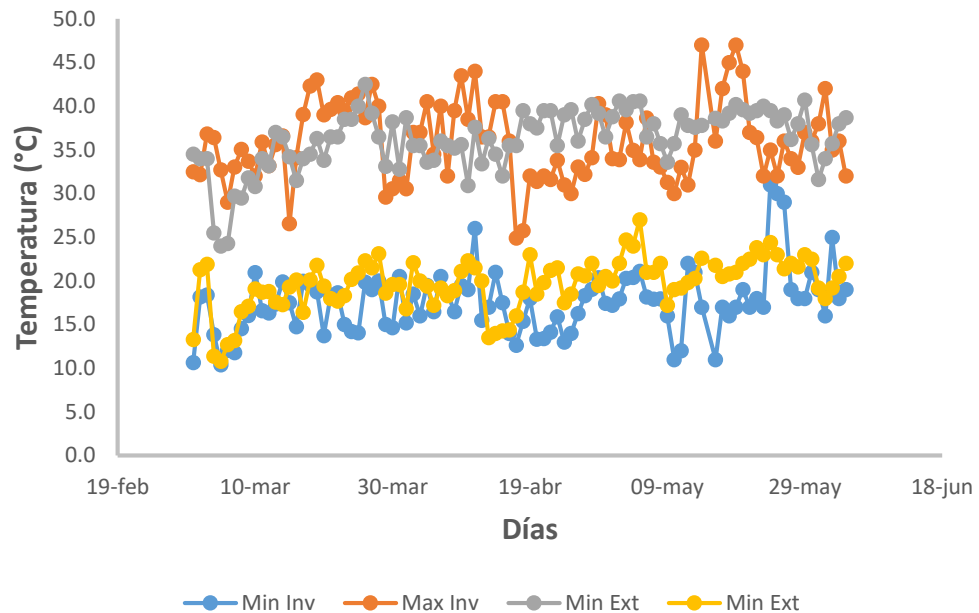


Figura 1. Temperaturas máximas y mínimas dentro y fuera del invernadero. UAAAN-UL, 2021.

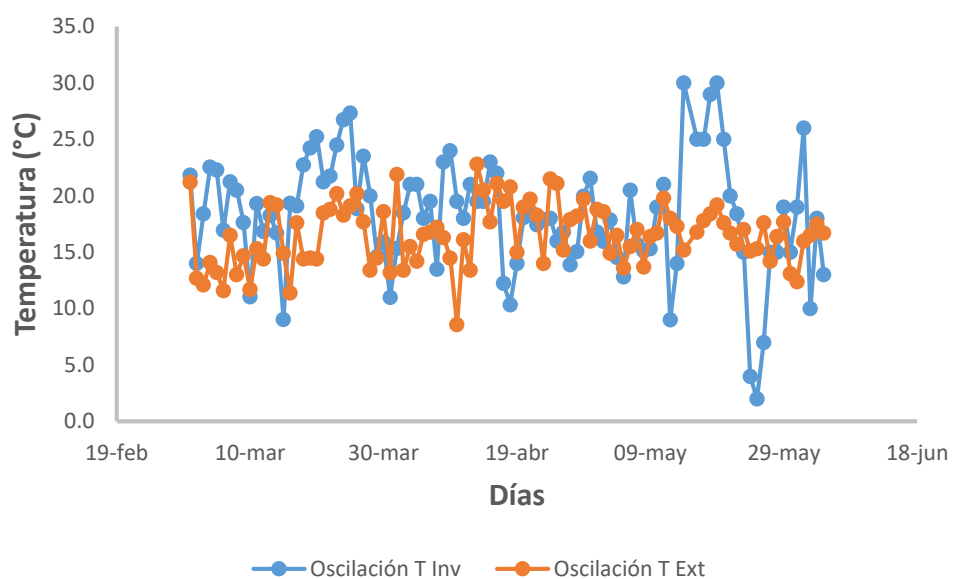


Figura 2. Oscilación térmica dentro y fuera del invernadero. UAAAN-UL, 2021.

3.1.4 Humedad Relativa

A continuación, en las siguientes figuras se muestra el registro de humedad relativa durante la evaluación del experimento en tomate (*Solanum lycopersicum* L.)

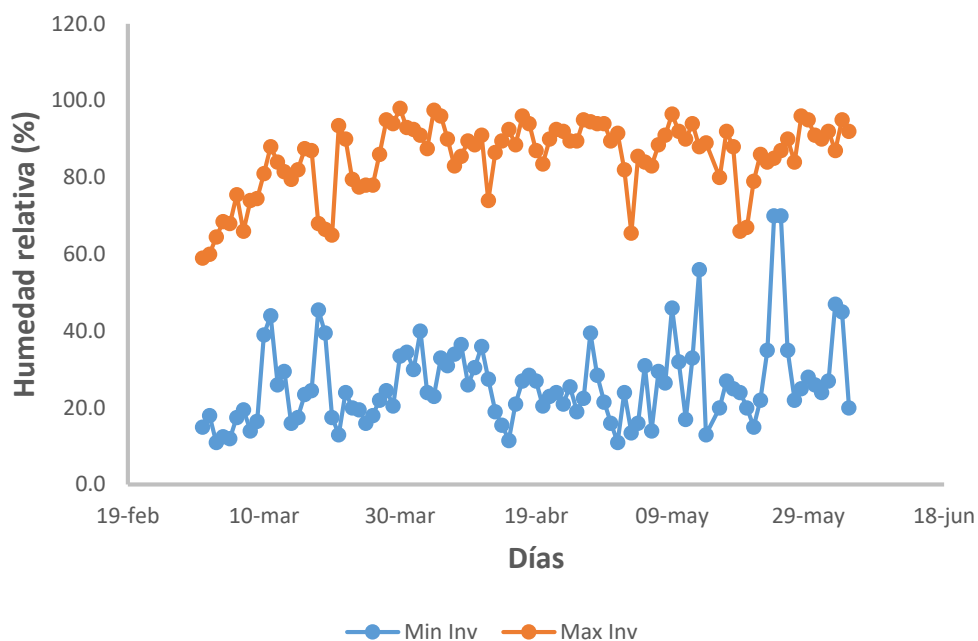


Figura 3. Humedad relativa máxima y mínima dentro del invernadero. UAAAN-UL, 2021.

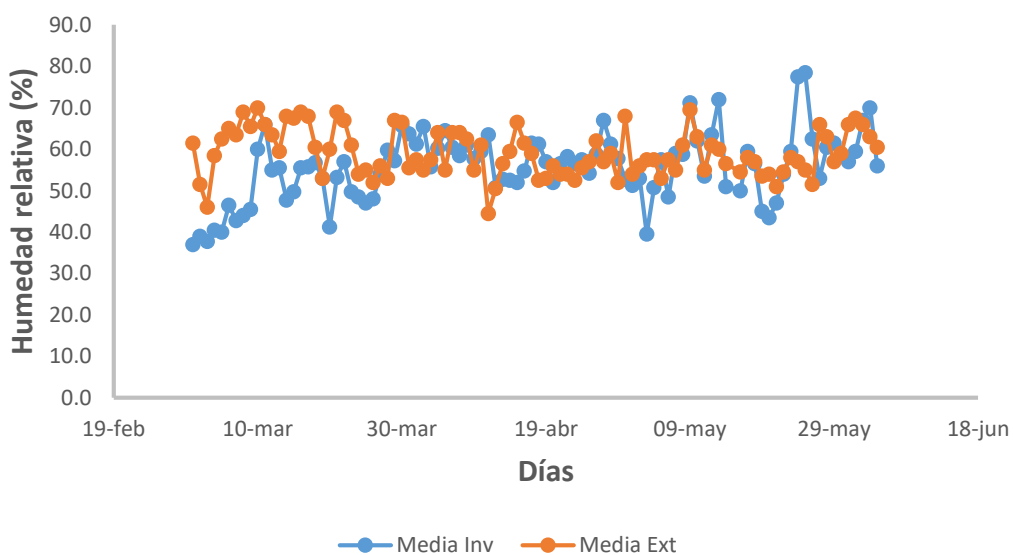


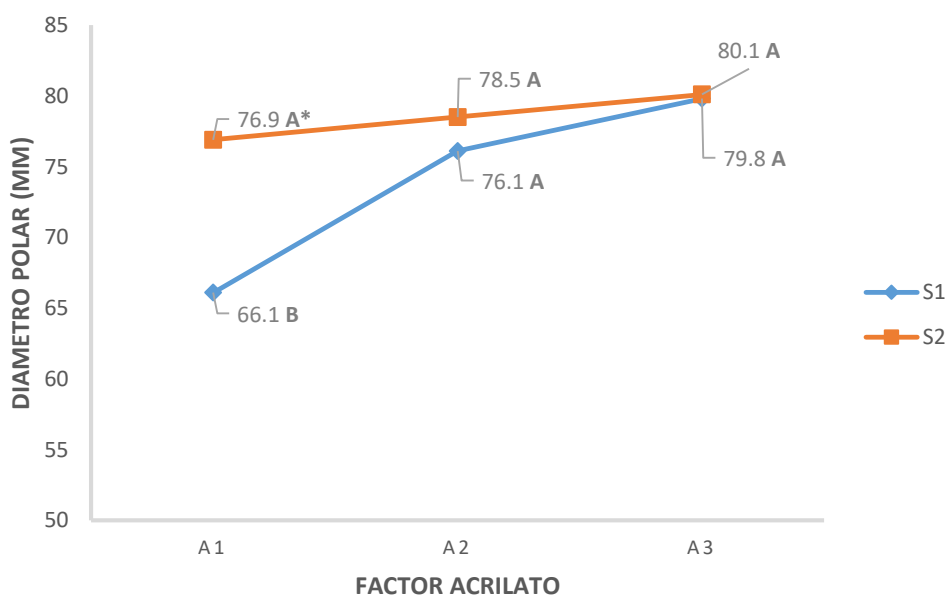
Figura 4. Humedad relativa media dentro y fuera del invernadero. UAAAN-UL, 2021.

3.2 Calidad y rendimiento

3.2.1 Diámetro polar

El análisis de varianza para la variable diámetro polar detectó diferencias altamente significativas en los factores siguientes: acrilato, sustrato y la interacción acrilato*sustrato (Cuadro1A).

En la figura 5 se puede observar que cinco de los tratamientos fueron estadísticamente iguales (S1*A2, S1*A3, S2*A1, S2*A2 y S2*A3) con 76.1, 79.8, 76.9, 78.5, y 80.1 mm respectivamente. El mayor diámetro polar fue 80.1 mm y se obtuvo con la dosis de seis gramos de acrilato de potasio por litro de sustrato en el sustrato mezcla (S2*A3). El testigo sin acrilato de potasio en el sustrato arena (S1*A1) fue significativamente diferente a todas las combinaciones anteriores presentando el diámetro polar más bajo de 66.1 mm.



*Letras distintas indican diferencia significativa DMS ($P \leq 0.05$).

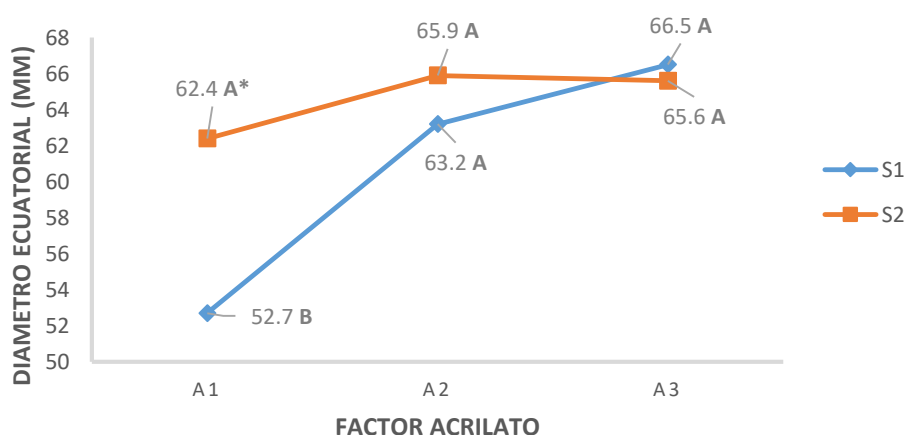
Figura 5. Comparación de medias para la variable diámetro polar obtenido en el factor acrilato*sustrato en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo condiciones de invernadero. UAAAN-UL, 2021.

3.2.2 Diámetro ecuatorial

El análisis de varianza para la variable diámetro ecuatorial detectó diferencias altamente significativas en el factor acrilato y diferencias significativas para los factores sustrato y la interacción acrilato*sustrato (Cuadro 2A).

En la figura 6 se puede observar que cinco de los tratamientos fueron estadísticamente iguales (S1*A2, S1*A3, S2*A1, S2*A2 y S2*A3) con 63.2, 65.6, 62.4, 65.9 y 66.5 mm respectivamente. El mayor diámetro ecuatorial fue 66.5 mm y se obtuvo con la dosis de seis gramos de acrilato de potasio por litro de sustrato en el sustrato arena (S1*A3). El testigo sin acrilato de potasio en el sustrato arena (S1*A1) fue significativamente diferente a todas las combinaciones anteriores presentado el diámetro ecuatorial más bajo de 52.7 mm.

Comparando los resultados del diámetro polar contra el diámetro ecuatorial se encontró que las combinaciones S2*A1, S1*A2, S2*A2, S1*A3, S2*A3 son significativamente iguales en ambos diámetros y la combinación S1*A1 es significativamente diferente a las combinaciones anteriores con el resultado más bajo en dichos diámetros.



*Letras distintas indican diferencia significativa DMS ($P \leq 0.05$).

Figura 6. Comparación de medias para la variable diámetro ecuatorial obtenido en el factor acrilato*sustrato en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo condiciones de invernadero. UAAAN-UL, 2021.

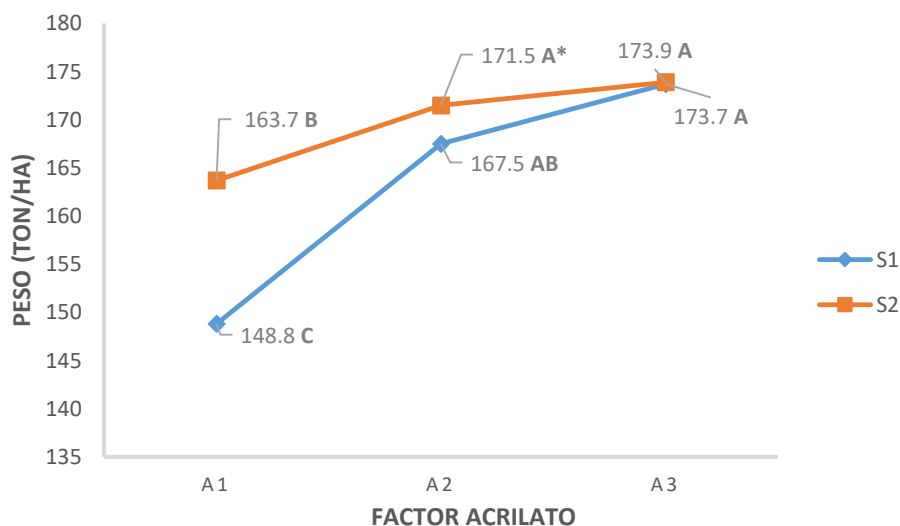
Chen *et al.* (2016) en un experimento encontraron que los polímeros superabsorbentes ayudan al suelo arenoso a retener el agua, aumentando el contenido de humedad del 24 % al 66 % después de que el suelo se satura. En otro estudio realizado por Khodadadi (2017) según sus resultados un polímero superabsorbente de nombre comercial Super-AB-A-200 podría almacenar agua y nutrientes en el suelo arenoso y liberarlos en condiciones de estrés aumentando su capacidad de retención de agua. Si contrastamos la información anterior con nuestros resultados podemos ver que el hidrogel utilizado en nuestro experimento mejoró la capacidad de retención de humedad del sustrato arena (S1), dando como resultado diferencias significativas en el diámetro polar y ecuatorial en los frutos de tomate (figura 5 y 6) comparado con el testigo. Sin embargo, la adición de acrilato de potasio no mostro diferencias significativas en estas variables para el sustrato mezcla. Claramente el acrilato de potasio puede funcionar como mejorador de suelos arenosos, haciéndolos capaces de retener humedad disponible para las plantas, en el presente experimento se reflejó en el aumento en el diámetro polar y ecuatorial del fruto.

Zhuang *et al.* (2013) realizaron una investigación en un suelo arenoso y encontraron que bajo la misma succión de agua (MPa) la retención de agua del suelo aumenta bajo la influencia del poliacrilato de sodio en comparación con el control, también qué cuanto mayor es la cantidad de poliacrilato de sodio, mayor es la retención de agua del suelo. Esto último podría estar relacionado con el aumento en el diámetro polar y ecuatorial en los diferentes tratamientos con forme aumentó la cantidad de acrilato de potasio, sin embargo, las diferencias no fueron significativas. Así mismo Idrobo *et al.* (2010) encontraron que la adición de 30.7 % de polímero superabsorbente mejoró la retención de agua, dando como resultado mejores rendimientos y menor pérdida de humedad, también que la mayor cantidad de hidrogel en un suelo arenoso incrementa la eficiencia en la retención del agua. Además, que el empleo de hidrogel mejoró la dosificación del fertilizante dándole mayor tiempo de aprovechamiento a la planta para la captación de nutrientes.

3.3 Rendimiento ton ha⁻¹

El análisis de varianza para la variable rendimiento ton ha⁻¹ detectó diferencias altamente significativas en los siguientes factores: acrilato, sustrato y la interacción acrilato*sustrato (Cuadro 4A).

En la figura 7 se puede observar que cuatro de los tratamientos fueron estadísticamente iguales (S1*A2, S1*A3, S2*A2 y S2*A3) con un rendimiento de 167.5, 173.7, 171.5 y 173.9 ton ha⁻¹ respectivamente. El mayor rendimiento fue de 173.9 ton ha⁻¹ y se obtuvo con la dosis de seis gramos de acrilato de potasio por litro de sustrato con el sustrato mezcla (S2*A3). El testigo sin acrilato de potasio en el sustrato mezcla (S2*A1) fue significativamente diferente a los tratamientos anteriores con un rendimiento de 163.7 ton ha⁻¹. El menor rendimiento fue de 148.8 ton ha⁻¹ y se obtuvo del testigo sin acrilato en el sustrato arena (S1*A1), el cual fue estadísticamente diferente al resto de los tratamientos.



*Letras distintas indican diferencia significativa DMS ($P \leq 0.05$).

Figura 7. Comparación de medias para la variable rendimiento ton ha⁻¹ obtenido en el factor acrilato*sustrato en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo condiciones de invernadero. UAAAN-UL, 2021.

Ahmed y Fahmy (2019) realizaron un estudio para evaluar el potencial de polímeros naturales (celulosa, almidón y compuesto de celulosa/almidón) para mejorar la disponibilidad de agua en el tomate (*Solanum lycopersicum*L), en el estudio utilizaron suelo franco arenoso a dosis de 2 g por kilogramo de suelo. En base a sus resultados se alcanzó un rendimiento del 20.5% más respecto al testigo. De acuerdo a nuestros resultados se alcanzó un 5.8 % más de rendimiento con respecto al testigo utilizando el sustrato mezcla (S2) a dosis de 6 g de acrilato de potasio (A3) y un 14.3 % para el caso del sustrato arena (S1) a la misma dosis. Aunque estos resultados fueron estadísticamente diferentes están muy por debajo de los reportados por dichos autores. Mandal *et al.* (2015) encontraron que la eficiencia agronómica de la aplicación de polímeros para tomate fue de 58 kg de tomate por kg de aplicación de polímero cuando los polímeros se aplicaron a 50 kg ha⁻¹, esto significa un aumento de 2.9 ton ha⁻¹ respecto al testigo. De acuerdo a nuestros resultados la diferencia mínima de rendimiento con respecto al testigo fue de 10.19 toneladas, pero con una aplicación de 900 kg ha⁻¹.

Figuroa-Soliz *et al.* (2020) realizaron un experimento en un cultivo de pimiento, en donde encontraron diferencia altamente significativa en el rendimiento (kg ha⁻¹) con la aplicación de 2 g de hidrogel por planta. En su estudio la aplicación del riego fue por gravedad, el cual se aplica cada 8 días, de acuerdo a sus resultados con la aplicación de hidrogel se reduce el volumen total de agua utilizada en riego a un 50 %. También encontraron diferencia significativa en las variables diámetro de tallo, longitud del fruto, diámetro del fruto y frutos por planta

Martyn y Szot (2001) en un estudio demostraron que los hidrogeles son componentes útiles de sustratos hortícolas que modifican sus propiedades físicas y aumentan considerablemente la retención de agua disponible para las plantas. Encontraron que es factible aplicar hidrogeles a los sustratos hortícolas, ya que pueden crear las condiciones favorables para el desarrollo y crecimiento de las plantas. En base a nuestros resultados, el rendimiento fue significativo en los dos sustratos utilizados, por lo que podemos decir que

el acrilato de potasio modifico las propiedades físicas de los sustratos haciendo que estos retengan más agua y la pongan a disposición de las plantas.

3.4 Agua

A continuación, se muestran los resultados encontrados acerca de la cantidad total de agua utilizada empleando tres y seis gramos de acrilato de potasio por litro de sustrato en el cultivo de tomate en invernadero.

En el cuadro 3 se muestra la huella hídrica (HH) para los tratamientos con y sin acrilato de potasio, así como también la cantidad de agua ahorrada en porcentaje (%) utilizando las dosis de tres y seis gramos de AP. En la figura 8 se puede apreciar como la huella hídrica disminuyó a medida que se incrementó la dosis de AP.

Cuadro 3. Huella hídrica del tomate en invernadero utilizando tres y seis gramos de acrilato de potasio/litro de sustrato. UAAAN-UL,2021.

Acrilato (g)	Sustrato	HH	Agua ahorrada (%)	Ton ha ⁻¹	m ³ ton ha ⁻¹
0	Arena	61.5	-	148.9	9147.1
3	Arena	54.3	11.7 %	167.5	9096.9
6	Arena	48.6	21.0 %	173.8	8447.2
0	Mezcla	58.7	-	163.7	9613.6
3	Mezcla	48.7	17.0 %	171.5	9613.6
6	Mezcla	46.5	20.1 %	173.9	9613.6

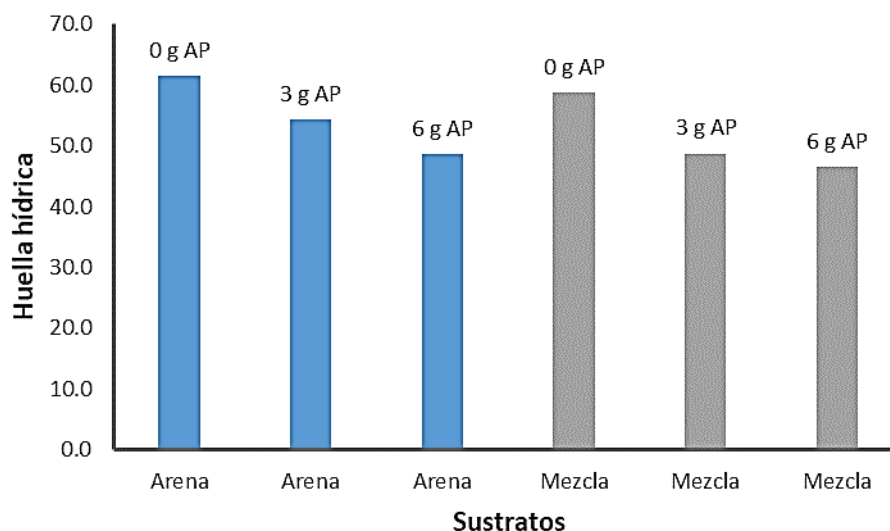


Figura 8. Huella hídrica del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en invernadero en los tratamientos con y sin acrilato de potasio. UAAAN-UL, 2021.

De acuerdo con los resultados anteriores, hubo una disminución en la huella hídrica comparado con los tratamientos testigos, los cuales no contenían acrilato de potasio. También se puede apreciar que a medida que se incrementó de tres a seis gramos del hidrogel, la cantidad de agua continuó disminuyendo.

Abedi-Koupai y Asadkazemi (2006) al estudiar la retención de agua para dos texturas de suelo, encontraron que la aplicación del polímero sintético Superab A200 (Rahab Resin Co. Ltd., bajo licencia del Instituto de Polímeros y Petroquímicos de Irán) aumentó el contenido volumétrico de agua. El aumento en el contenido de humedad en el suelo fue proporcional a la cantidad de aplicación de polímero, esto podía estar relacionado con nuestros resultados, ya que la huella hídrica disminuyó a medida que se incrementó la dosis. También sus resultados indican que el aumento máximo de contenido de humedad en el suelo obtenido a un nivel de aplicación de 6 g/kg en suelo franco arenoso fue >30 % y en suelo arcilloso >35 %. Estos resultados son similares a los reportados por Renkuan *et al.* (2016) al estudiar un polímero superabsorbente mejoró la capacidad de retención de agua en un promedio de 2.7% a 26.5 % entre los tratamientos.

Otro dato similar publicado por Pattanaik *et al.* (2015a) quienes estudiaron el hidrogel Stockosorb® (Evonik) y encontraron que aumenta la capacidad de retención de agua del suelo del 28.74 % al 34.63 % en el cultivo de limón.

Los mismos autores estudiaron un SAP en el cultivo de maíz y encontraron que la eficiencia del uso del agua aumenta significativamente ($P < 0.05$) después del tratamiento con SAP en un 97.1 % bajo déficit de riego (Islam *et al.*, 2011).

Rehman *et al.* (2011) reportaron que la aplicación de hidrogel al cultivo de arroz mejoró el contenido de humedad del suelo en todas las técnicas de siembra. El porcentaje máximo de humedad del suelo fue de 13.53 % a 14.63 % y para la siembra sin aplicación de hidrogel la humedad mínima del suelo fue entre 9.88 % a 11.15 % en la profundidad del suelo de 0-15 cm.

En un estudio realizado por Rivera-Fernández *et al.* (2018) en el cultivo de chile (*Capsicum annuum* L.) encontraron diferencias significativas en el consumo de agua, bajo las dosis de 2 g/planta y 2.5 g/planta, con valores que alcanzaron un consumo total de 197.6 y 196 mm de lámina de riego respectivamente. El valor de la lámina de riego para el tratamiento de control fue de 388.6 mm, lo que demostró que es posible ahorrar hasta un 40 % de agua.

3.4.1 Análisis económico

Para el análisis económico se utilizó la metodología CIMMYT conocida como Presupuesto Parcial (Espinoza-Arellano *et al.*, 2010). Esta consiste en analizar y comparar los conceptos de costos e ingresos que difieren entre los tratamientos. Se calculó el ingreso marginal (Img) y el costo marginal (Cmg). El costo marginal (Cmg) se define como el incremento en el costo total atribuible al tratamiento alternativo (con acrilato de potasio), para nuestro caso es de 107,820 y 215,640 pesos·ha⁻¹ (costo inicial) al utilizar tres y seis gramos respectivamente de acrilato de potasio/litro de sustrato en macetas con capacidad de 12 litros. El acrilato de potasio tiene una vida útil de ocho años, pero su efectividad se reduce a partir de los seis años, por lo que es necesario incorporar cierta cantidad del mismo. Para realizar el análisis económico en este estudio se tomará en cuenta los seis años que dura su efectividad máxima.

El ingreso marginal (Img) se define como el ingreso adicional atribuible al tratamiento alternativo (con acrilato de potasio). Si el ingreso marginal es mayor que el costo marginal, entonces se acepta el cambio tecnológico.

Costo marginal (Cmg)

➤ Costo del acrilato de potasio (kg)= \$119.8

- Tratamientos con 3 g de AP

Capacidad de la maceta: 12 litros = 36 g

Densidad de población: 25.000 plantas ha⁻¹

Total de producto empleado = 900 kg ha⁻¹ x \$119.8

Cmg= Costo inicial: \$107,820ha⁻¹

Cmg= Costo anual: \$17,970 ha⁻¹

- Tratamientos con 6 g AP

Capacidad de la maceta: 12 litros = 72 g

Densidad de población: 25.000 plantas ha⁻¹

Total de producto empleado = 1800 kg ha⁻¹ x \$119.8

Cmg= Costo inicial \$215,640 ha⁻¹

Cmg= Costo anual: \$35,940 ha⁻¹

Ingreso marginal (Img)

$$\text{Img} = \text{Pmg} \times \text{Pr}$$

Donde:

Img: Ingreso marginal

Pr: precio del producto

Pmg: producto marginal

El Pmg es la cantidad adicional de tomate comercial en que supera a la producción sin acrilato de potasio. Para este caso se obtuvo por diferencias entre los tratamientos con AP y los tratamientos sin AP.

El precio de 5,542.79 pesos por tonelada fue el precio durante el ciclo primavera-verano 2020 en la Laguna de Coahuila (SIAP, 2020). Ya que el Cmg es anual el Img obtenido se multiplico por dos, esto debido a que anualmente se producen dos ciclos de cultivo (primavera-verano y otoño-invierno).

Cuadro 4. Ingreso marginal al utilizar tres y seis gramos de acrilato de potasio/litro de sustrato en el cultivo de tomate en invernadero. UAAAN-UL, 2021.

Acrilato (g)	Sustrato	Ton ha ⁻¹	Img (fórmula)	Img	Cmg (3 g AP)	Cmg (6 g AP)
0	Arena	148.9	-	-	-	-
3	Arena	167.5	18.6 x \$5,542.79 x 2	\$206,190	\$17,970	\$35,940
6	Arena	173.8	24.9 x \$5,542.79 x 2	\$276,030	\$17,970	\$35,940
0	Mezcla	163.7	-	-	-	-
3	Mezcla	171.5	7.8 x \$5,542.79 x 2	\$86,467	\$17,970	\$35,940
6	Mezcla	173.9	10.2 x \$5,542.79 x 2	\$113,072	\$17,970	\$35,940

En base a los resultados del cuadro anterior al hacer una comparación del Img contra el Cmg podemos observar que en las dos dosis utilizadas de AP el Igm es superior al Cmg, así como también que el Igm aumentó cuando se utiliza la dosis de seis gramos. Por lo tanto, podemos decir que es rentable la utilización de esta tecnología. Cabe destacar que los ingresos más altos se obtuvieron utilizando el sustrato arena.

A continuación, en el cuadro 5 se compara el costo del agua ahorrada contra el costo marginal (Cmg). El costo del agua en metros cúbicos (m³) se estableció de acuerdo a lo citado por Ramírez-Barraza *et al.* (2019), el cual corresponde a \$1.56 m³. El costo del agua ahorrada se multiplicó por dos, ya que se consideraron dos ciclos de cultivo (primavera-verano y otoño-invierno).

La cantidad de agua ahorrada se obtuvo por diferencias entre los tratamientos con AP y los tratamientos sin AP.

Cuadro 5. Comparación entre el costo del agua ahorrada en los tratamientos con acrilato de potasio y el Cmg. UAAAN-UL, 2021.

Acrilato (g)	Sustrato	Agua ahorrada m3	Costo agua ahorrada(\$)	Cmg (3 g AP)	Cmg (6 g AP)
0	Arena	-	-	\$17,970	\$35,940
3	Arena	207	\$627		
6	Arena	700.0	\$2,184		
0	Mezcla	-	-		
3	Mezcla	798	\$2,491		
6	Mezcla	1,066	\$3,326		

Al hacer una comparación con los datos del cuadro anterior (cuadro 5) entre el costo del agua ahorrada y el Cmg, se puede apreciar que el Cmg es más elevado en comparación con el valor del agua que se ahorró.

4 CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente experimento se llegó a las siguientes conclusiones.

El uso del acrilato de potasio tuvo resultados significativos cuando se incorpora a los sustratos arena y en mezcla (50 % arena - 40 % compost - 10 % perlita), los beneficios del acrilato de potasio se reflejaron en las variables diámetro polar, diámetro ecuatorial y el rendimiento.

El crecimiento de las plantas tratadas con el hidrogel no se vio beneficiado en comparación con los tratamientos testigos, al igual que el grosor del tallo ya que los resultados para esta variable fueron muy similares entre los tratamientos tratados y no tratados con acrilato de potasio.

La variable diámetro polar y diámetro ecuatorial incrementan significativamente cuando el sustrato arena es tratado con acrilato de potasio, lo que no sucedió en la mezcla de sustrato. Esto puede deberse a que el hidrogel modifica las propiedades físicas de la arena reteniendo por mayor tiempo la humedad, además de que puede estar asociado con la capacidad de almacenar los nutrientes dentro en su estructura.

El rendimiento incrementa con la incorporación de acrilato de potasio en los dos sustratos estudiados, pero este no muestra una diferencia significativa cuando se aumenta la dosis del hidrogel. Aunque hubo diferencias significativas entre ambos sustratos cuando no son tratados con el hidrogel, la incorporación de las mismas dosis no resultó estadísticamente diferente.

La huella hídrica para la producción de tomate se redujo con la aplicación del acrilato de potasio en ambos sustratos, reduciéndose aún más cuando la dosis se aumentó de tres a seis gramos por litro de sustrato.

El ingreso marginal (Img) fue superior respecto al costo marginal (Cmg) en las dos dosis analizadas. Lo anterior demuestra que el Img obtenido fue lo suficiente para justificar el uso del AP, aunque el aumento en la dosis no mostró diferencias estadísticas en el rendimiento.

Por lo tanto, podemos decir que el uso del AP ayuda a ahorrar agua cuando se incorpora a diferentes sustratos, además de aumentar el rendimiento y la calidad de los frutos.

5 REFERENCIAS

- Abedi-Koupai, J. y J. Asadkazemi 2006. "Effects of a hydrophilic polymer on the field performance of an ornamental plant (*cupressus arizonica*) under reduced irrigation regimes." *Iranian Polymer Journal* 15: 715-725.
- Abobatta, W. 2018. "Impact of hydrogel polymer in agricultural sector." *Advances in Agriculture and Environmental Science* 1: 59-64.
- Abobatta, W. F. y S. M. Khalifa 2019. "Influence of Hydrogel Composites Soil Conditioner on Navel Orange Growth and Productivity." *Journal of Agriculture and Horticulture Research* 2: 1-6.
- Ahmed, E. M. 2015. "Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review." *Journal of Advanced Research* 6: 105–121.
- Ahmed, S. S. y A. H. Fahmy 2019. "Applications of natural polysaccharide polymers to overcome water scarcity on the yield and quality of tomato fruits." *J. Soil Sci. and Agric. Eng., Mansoura Univ.* 10: 199 - 208.
- Andrada, H. y G. Di Barbaro 2018. "Efecto de la aplicación de copolímeros sobre el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.)." *Revista de Ciencias Agrícolas* 34: 27-35.
- Ayas, S. 2019. "Water-yield relationships of deficit irrigated tomato (*Lycopersicon lycopersicum* L. var. HazaR F1)." *Applied ecology and environmental research* 17: 7765-7781.
- Baran, A., T. Zaleski, E. Kulikowski y J. Wieczorek 2015. "Hydrophysical and biological properties of sandy substrata enriched with hydrogel." *Pol. J. Environ. Stud.* 24: 2355-2362.
- Barón-Cortés, A., I. X. Barrera-Ramírez, L. F. Boada-Eslava y G. Rodríguez-Niño 2007. "Evaluación de hidrogeles para aplicaciones agroforestales." *Revista ingeniería e investigación* 27: 35-44.
- Barros, A. F., L. Duarte-Pimentel, E. Fontes-Araujo, L. Roberto-Macedo, H. E. Prieto Martinez, V. A. Pereira Batista y M. Queiroz da Paixão 2017. "Super absorbent polymer application in seeds and planting furrow: it will be a new opportunity for rainfed agriculture." *Semina: Ciências Agrárias* 38: 1703-1714.
- Battilani, A. (2012). Tomate *In*: Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Estudio FAO: riego y drenaje. Roma, Italia, FAO. pp 198-204.
- Bernacchi, C. J. y A. VanLoocke 2015. "Terrestrial ecosystems in a changing environment: A dominant role for water." *Annu. Rev. Plant Biol.* 66: 599–622.
- Buchmann, C. y E. G. Schaumann 2017. "Effect of water entrapment by a hydrogel on the microstructural stability of artificial soils with various clay content." *Plant Soil* 414: 181-198.
- Cannazza, G., A. Cataldo, E. De Benedetto, C. Demitri, M. Madaghiele y A. Sannino 2014. "Experimental assessment of the use of a novel superabsorbent polymer (SAP) for the optimization of water consumption in agricultural irrigation process." *Water* 6: 2056-2069.
- Chartzoulakisa, K. y M. Bertaki 2015. "Sustainable water management in agriculture under climate change." *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 4: 88 – 98.

- Chen, F. M., J. Wondergem, M. Peterson, J. Kalies y W. Santos 2016. "The Effect of Polymers for Soil Stabilization and Soil Nutrient Retention." *International Journal of Applied Science - Research and Review* 3: 1-6.
- Da Silva, J. C., J. A. Frizzzone, A. C. da Silva, A. Golynski, M. L. F. da Silva y C. A. Megguer 2019. "Tomato yield as a function of water depths and irrigation suspension periods." *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 23: 591-597.
- Dar, B., M. Dheeraj, R. Zahida y B. B. Afshana 2017. "Hydrogel: To Enhance Crop Productivity Per Unit Available Water Under Moisture Stress Agriculture." *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences* 6: 129-135.
- Dehkordi, D. K. 2016. "The Effects of Superabsorbent Polymers on Soils and Plants." *Pertanika J. Trop. Agric. Sci.* 39: 267-298.
- Di Barbaro, M. G., H. E. Andrada, I. Paz de Arias, S. Cléríci y M. S. Batallán 2013. "Acrilato de potasio en la formulación de inoculantes de *Azospirillum brasilense* y su aplicación en semillas de lechuga." *Biología en agronomía* 3: 66-77.
- Ekebafé, L. O., D. E. Ogbeifun y F. E. Okieimen 2011. "Polymer applications in agriculture." *Biokemistri* 23: 81-89.
- El-Chami, D. y M. El-Moujabber 2016. "Drought, climate change and sustainability of water in agriculture: A roadmap towards the NWR2." *South African Journal of Science* 112: 1-4.
- Escobosa, G. I., K. M. Bali, A. Pérez y J. Román 2014. "Effect of the use of potassium polyacrylate clay soils for optimization of irrigation water in the valley of Mexicali, Baja California, Mexico." *International Journal of Current Research* 6: 9808-9809.
- Espinoza-Arellano, J. d. J., P. Cano-Ríos, M. Medina-Elizondo y V. M. Molina-Morejón 2010. "Evaluación técnica y económica de la generación y transferencia de la tecnología de producción "camas angostas" en melón en la comarca lagunera, México." *PRODUCCIÓN AGRÍCOLA – AGROFAZ* 10: 137-144.
- FAO 2019. "Agua." <http://www.fao.org/water/es/> Consultado el 11 de octubre de 2019.
- Figueroa-Soliz, F. F., J. A. Andrade-Almeida, J. W. Santana-Sornoza y C. Y. Menéndez-Cevallos 2020. "Evaluación de diferentes niveles de hidrogel en el cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.) para prolongar los periodos de riego." *Revista Científica SAPIENTIAE* 3: 52-64.
- Florido, B. M. y F. L. Bao 2014. "Tolerancia a estrés por déficit hídrico en tomate (*Solanum lycopersicum* L.)." *Cultivos Tropicales* 35: 70-88.
- Fonteno, W. C. y T. E. Bilderback 1993. "Impact of hydrogel on physical properties of coarse-structured horticultural substrates." *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 118: 217-222.
- Geesing, D. y U. Schmidhalter 2004. "Influence of sodium polyacrylate on the water-holding capacity of three different soils and effects on growth of wheat." *Soil Use and Management* 20: 207-209.
- Gilsanz, J. 2007. "Hidroponía." *Programa Nacional de Producción Hortícola Est. Expt. Las Brujas*: 31 p.
- Gleick, H. P. 2003. "Water use." *Annual Review of Environment and Resources* 28: 275–314.

- Gómez, M. A. y L. A. Cañamero 2011. "Juguetes y polímeros superabsorbentes." *Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias* 8: 460-465.
- Guilherme, M. R., F. A. Aouada, A. R. Fajardo, A. F. Martins, A. T. Paulino, F. T. Davi, A. F. Rubira y E. C. Muniz 2015. "Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier: A review." *European Polymer Journal* 72: 365–385.
- Hydro-Environment 2015. "Importancia del cultivo de tomate en México." *Hidroponia.mx* <http://hidroponia.mx/importancia-del-cultivo-de-jitomate-en-mexico/> Consultado el 06 de Noviembre de 2019
- Idrobo, H. J., A. M. Rodríguez y J. E. Díaz-Ortíz 2010. "Comportamiento del hidrogel en suelos arenosos." *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente* 9: 33-37.
- INIA 2017. "Manual de cultivo del tomate bajo invernadero." 377: 111 p. .
- INIFAP 2012. "Guía para cultivar jitomate en condiciones de malla sombra en San Luis Potosí." Folleto técnico: 40 p.
- INTA 2016. "Manual técnico del cultivo de tomate *Solanum lycopersicum*." Costa Rica. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria: 126 p.
- INTAGRI 2017a. "La hidroponía: cultivos sin suelo." *Serie horticultura protegida* 29: 5 p.
- INTAGRI 2017b. "Soluciones nutritivas para el cultivo de tomate." *Serie horticultura protegida* 33: 5 p.
- INTAGRI 2018. "El cultivo de tomate." *Serie Hortalizas* 14: 9 p.
- Islam, M. R., Y. Hu, S. Mao, J. Mao, A. E. Enejid y X. Xue 2011. "Effectiveness of a water-saving super-absorbent polymer in soil water conservation for corn (*Zeamays L.*) based on eco-physiological parameters." *J Sci Food Agric* 91: 1998–2005.
- Kalhpure, A., R. Kumar, V. P. Singh y D. S. Pandey 2016. "Hydrogels: a boon for increasing agricultural productivity in water-stressed environment." *Current science* 111: 1773-1779.
- Kassim, F. S., M. F. El-Koly y S. S. Hosny 2017. "Evaluation of Super Absorbent Polymer Application on Yield, and Water Use Efficiency of Grand Nain Banana Plant." *Middle East Journal of Agriculture Research* 6: 188-198.
- Khodadadi, D. D. 2017. "Effect of superabsorbent polymer on salt and drought resistance of eucalyptus globulus." *APPLIED ECOLOGY AND ENVIRONMENTAL RESEARCH* 15: 1791-1802.
- Khodadadi, D. D. 2018. "Effects of hydrophilic polymers on soil water, wheat plant and microorganisms." *Applied ecology and environmental research* 16: 1711-1724.
- Kiatkamjornwong, S. 2007. "Superabsorbent polymers and superabsorbent polymer composites." *ScienceAsia* 33: 39-43.
- Kumar, V. A. y A. Singh 2018. "Harnessing the Potential of Superabsorbent Polymers for Alleviating Drought and Salt Stresses in Fruit Crops: a Brief Review." *Advances in Agriculture Technology and Plant Sciences* 1: 1-10.

- Lejcus, K., M. Spitalniak y J. Dabrowska 2018. "Swelling behaviour of superabsorbent polymers for soil amendment under different loads." *Polymers* 10: 1-13.
- Malik, A. M. 2018. "Hydroponic tomato production and productivity improvement in Pakistan." *Pakistan Journal of Agricultural Research* 31: 133-144.
- Mancosu, M., R. L. Snyder, G. Kyriakakis y D. Spano 2015. "Water scarcity and future challenges for food production." *Water* 7: 975-992.
- Mandal, U. K., K. L. Sharma, K. Venkanna, G. R. Korwar, K. S. Reddy, Pushpanjali, N. N. Reddy, G. Venkatesh, R. N. Masane y P. Yadaiah 2015. "Evaluating Hydrogel Application on Soil Water Availability and Crop Productivity in Semiarid Tropical Red Soil." *Indian J. Dryland Agric. Res. & Dev.* 30: 01.
- Martyn, W. y P. Szot 2001. "Influence of superabsorbents on the physical properties of horticultural substrates." *International Agrophysics* 15: 87-94.
- Mavrogianopoulos, G. N. 2016. "Irrigation dose according to substrate characteristics, in hydroponic systems." *Open Agriculture* 1: 1-6.
- Medina-Saavedra, T., G. Arroyo-Figueroa y J. G. Dzul-Cauih 2017 "Origin and evolution of tomato production *Lycopersicon esculentum* in México " *Ciência Rural, Santa Maria* 47: 1-8.
- Meng, Z., A. Duan, D. Chen, K. B. Dassanayake, X. Wang, Z. Liu, H. Liu y S. Gao 2017. "Suitable indicators using stem diameter variation-derived indices to monitor the water status of greenhouse tomato plants." *PLOS ONE*: e0171423.doi:10.1371/ journal.pone.0171423 12: 1-15.
- Milani, P., D. França, A. G. Balieiro y R. Faez 2017. "Polymers and its applications in agriculture." *Polímeros* 27: 256-266.
- Montesano, F. F., A. Parente, P. Santamaria, A. Sannino y F. Serio 2015. "Biodegradable Superabsorbent Hydrogel Increases Water Retention Properties of Growing Media and Plant Growth." *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 4: 451-458.
- Namvar, H., A. Asgharzade, M. Babaeian y E. Hosseinzade 2014. "The effects of superabsorbent polymer on yield and yield component of two grape varieties." *International Journal of Biosciences* 4: 18-23.
- Nariman, B. S., A. Majid, R. D. Hamid y A. Ebrahim 2013. "Study effects of super absorbent application, saline water and irrigation management on yield and yield components of peanut (*Arachis hypogaea* L.)." *Annals of biological research* 4: 160-169.
- Neethu, T. M., P. K. Dubey y A. R. Kaswala 2018. "Prospects and Applications of Hydrogel Technology in Agriculture." *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 7: 3155-3162.
- Nirmala, A. y G. Thirupathaiah 2019. "Hydrogel/superabsorbent polymer for water and nutrient management in horticultural crops-review." *International Journal of Chemical Studies* 7: 787-795.
- Oksińska, M. P., E. G. Magnucka, K. Lejcuś y S. J. Pietr 2016. "Biodegradation of the cross-linked copolymer of acrylamide and potassium acrylate by soil bacteria." *Environ Sci Pollut Res* 23: 5969–5977.
- Ortega-Torres, A. E., L. B. Flores Tejeida, R. G. Guevara-González, E. Rico-García y G. M. Soto-Zarazúa 2020. "Hidrogel acrilato de potasio como

- sustrato en cultivo de pepino y jitomate." *Revista Mexicana Ciencias Agrícolas* 11: 1447-1455.
- Paredes, Z. A. 2009. "Manual del cultivo de tomate en invernadero." Colombia, Corpoica: 56 p.
- Pattanaaik, S. K., L. B. Singh, P. Wangchu, B. N. Debnath, Hazarika y A. K. Pandey 2015a. "Effect of Hydrogel on Water and Nutrient Management of Citrus limon." *International Journal of Agriculture Innovations and Research* 3: 2319-1463.
- Pattanaaik, S. K., L. Wangchu, B. Singh, B. N. Hazarika, S. M. Singh y A. K. Pandey 2015b. "Effect of hydrogel on water and nutrient management of Citrus reticulata." *Res. on Crops* 16: 98-103.
- Portalfruticola.com 2017. "Cómo hacer y utilizar polímeros de hidrogel para retener la humedad en el suelo." <https://www.portalfruticola.com/noticias/2017/10/04/como-hacer-y-utilizar-polimeros-de-hidrogel-para-retener-la-humedad-en-el-suelo/?fbclid=IwAR329kKY6iPFVmiSw7KNGb0t2XdJegWFH08F3Y89COWzKQOzPjcM3HjrUuk>: Consultado el 04 de Noviembre de 2019.
- Putra, P. A. y H. Yuliando 2015. "Soilless culture system to support water use efficiency and product quality: A review." *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 3: 283 – 288.
- Rajiv, D., B. Neelkanth y P. Bipin 2013. "Super absorbent polymers - an innovative water saving technique for optimizing crop yield." *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 2.
- Ramírez-Barraza, B. A., A. González-Estrada, R. Valdivia-Alcalá, J. M. Salas González y J. A. García-Salazar 2019. "Tarifas eficientes para el agua de uso agrícola en la Comarca Lagunera." *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10: 539-550.
- Ramos-Cruz, C. M., E. R. Pérez-Evangelista, E. Miguel-Valle, D. Ramírez-Delgado y J. Maltos-Buendía 2018. "Panorama de la situación del agua y la agricultura: Una revisión." *Ciencia e Innovación* 1: 309-319.
- Rehman, A., R. Ahmad y M. Safdar 2011. "Effect of hydrogel on the performance of aerobic rice sown under different techniques." *PLANT SOIL ENVIRON* 57: 321–325.
- Renkuan, L., W. Wenyong, R. Shumei y Y. Peiling 2016. "Effects of Superabsorbent Polymers on the Hydraulic Parameters and Water Retention Properties of Soil." *Journal of Nanomaterials*: 1-11.
- Rivera-Fernández, R. D. y F. Mesías-Gallo 2018. "Absorción de agua de hidrogel de uso agrícola y su humedecimiento de tres tipos de suelo." *Rev. FCA UNCUYO* 50: 15-21.
- Rivera-Fernández, R. D., J. F. Rodríguez, G. F. Mesías y D. A. Mendoza-Intriago 2018. "Hydrogel for improving water use efficiency of Capsicum annuum crops in Fluvisol soil." *Rev. FCA UNCUYO* 50: 23-31.
- Rojas, G. B., M. Ramírez, R. Aguilera, J. L. Prin y C. Torres 2006. "Los hidrogeles poliméricos como potenciales reservorios de agua y su aplicación en la germinación de semillas de tomate en diferentes tipos de suelos." *Revista Iberoamericana de Polímeros* 7: 199-210.

- Rosegrant, M. W., C. Ringler y T. Zhu 2009. "Water for agriculture: maintaining food security under growing scarcity." *Annual Review of Environment and Resources* 34: 205-222.
- Rudzinski, W. E., A. M. Dave, U. H. Vaishnav, S. G. Kumbar, A. R. Kulkarni y T. M. Aminabhavi 2002. "Hydrogels as controlled release devices in agriculture." *Designed Monomers and Polymers* 5: 39-65.
- SADER 2020. "El jitomate, hortaliza mexicana de importancia mundial." <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-jitomate-hortaliza-mexicana-de-importancia-mundial?idiom=es>: Consultado el 25 de Octubre de 2021.
- SAGARPA 2017. "Planeación Agrícola Nacional 2017-2030 "Jitomate Mexicano"." <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-jitomate-hortaliza-mexicana-de-importancia-mundial?idiom=es>: 1-14.
- Saifuldeen, A. S. 2015. "Effect of water-retaining agent(sky gel) on soil physical properties, growth, yield and water use efficiency of wheat (*triticum aestivum* L.) plant." *j.Biol.Chem.Environ.Sci.* 6: 1-14.
- Serna, C. M., A. y M. Guancha 2017. "Natural fibers for hydrogels production and their applications in agriculture." *Acta Agronómica* 66: 495-505.
- Shanin, S., I. S. Md. Khayrul, P. N. Husna, M. A. Walliullah, U. S. Md. Khabir y R. H. Md 2017. "Swelling and physico-mechanical properties of synthesized sodium polyacrylate hydrogels." *International Journal of Advanced Research* 5: 84-92.
- SIAP 2020. "Anuario estadístico de la producción agrícola." <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>: Consultado el 23 de Agosto de 2021.
- Stanghellini, C. 2014. "Horticultural production in greenhouses: Efficient use of water." *Acta horticulturae*: 25-32.
- Xu, H., K. Yeum, Y. H. Yoon y J. H. Ju 2018. "Effect of hydrophilic polymer in three green roof substrates on growth, flower development, and overwintering of agastache rugosa (korean mint) without irrigation." *Applied ecology and environmental research* 16 5503-5516.
- Yangyuoru, M., E. Boateng, S. G. K. Adiku, D. Acquah, T. A. Adjadeh y F. Mawunya 2006. "Effects of natural and synthetic soil conditioners on soil moisture retention and maize yield." *West Africa Journal of Applied Ecology* 9: 1-8.
- Zhuang, W., L. Li y C. Liu 2013. "Effects of sodium polyacrylate on water retention and infiltration capacity of a sandy soil." *Springer Plus* 2: 1-7.
- Zohuriaan-Mehr, M. J. y K. Kabiri 2008. "Superabsorbent polymer materials: A review." *Iranian Polymer Journal* 17: 451-477.

6 ANEXOS

Análisis de varianza para las diferentes variables

A continuación, se presentan los análisis de varianza para las diferentes variables, donde se encontraron diferencias significativas únicamente en las variables diámetro polar, diámetro ecuatorial y peso ton/ha.

Cuadro 1A. Análisis de varianza para la variable Diámetro Polar en las variedades de tomate estudiadas con las diferentes muestras de acrilato de potasio en los dos sustratos. UAAAN UL, 2021.

Causa de Variación	G. L.	Cuadrados medios	F cal	Nivel de significancia
Bloque	3	160.70	7.36	**
Acilato (A)	2	298.89	13.69	**
Sustratos (S)	1	243.00	11.13	**
Variedades (V)	1	1.08	0.05	NS
Interacción (A x S)	2	122.53	5.61	**
Interacción (A x V)	2	13.70	0.63	NS
Interacción (S x V)	1	26.10	1.2	NS
Interacción (A x S x V)	2	14.00	0.69	NS
Error	33	21.83		
Total	47			

** = Altamente significativo <0.01 y NS = No hay significancia ≥ 0.05 .

Cuadro 2A. Análisis de varianza para la variable Diámetro Ecuatorial en las variedades de tomate estudiadas con las diferentes muestras de acrilato de potasio en los dos sustratos. UAAAN UL, 2021.

Causa de Variación	G. L.	Cuadrados medios	F cal	Nivel de significancia
Bloque	3	77.42	3.19	NS
Acrilato (A)	2	332.22	13.67	**
Sustratos (S)	1	176.71	7.27	*
Variedades (V)	1	0.11	0.00	NS
Interacción (A x S)	2	116.17	4.78	*
Interacción (A x V)	2	1.07	0.04	NS
Interacción (S x V)	1	31.20	1.28	NS
Interacción (A x S x V)	2	5.34	0.22	NS
Error	33	24.30		
Total	47			

* = significativo <0.05, ** = Altamente significativo <0.01 y NS = No hay significancia ≥ 0.05 .

Cuadro 3A. Análisis de varianza para la variable Grosor de la pulpa en las variedades de tomate estudiadas con las diferentes muestras de acrilato de potasio en los dos sustratos. UAAAN UL, 2021.

Causa de Variación	G. L.	Cuadrados medios	F cal	Nivel de significancia
Bloque	3	0.157	1.28	**
Acrilato (A)	2	4.704	38.3	NS
Sustratos (S)	1	0.030	0.24	NS
Variedades (V)	1	0.020	0.17	NS
Interacción (A x S)	2	0.023	0.19	NS
Interacción (A x V)	2	0.270	2.20	NS
Interacción (S x V)	1	0.140	1.15	NS
Interacción (A x S x V)	2	0.053	0.44	NS
Error	33	0.122		
Total	47			

** = Altamente significativo <0.01 y NS = No hay significancia ≥ 0.05 .

Cuadro 4A. Análisis de varianza para la variable Rendimiento ton^{-1} en las variedades de tomate estudiadas con las diferentes muestras de acrilato de potasio en los dos sustratos. UAAAN UL, 2021.

Causa de Variación	G. L.	Cuadrados medios	F cal	Nivel de significancia
Bloque	3	65.83	1.62	NS
Acrilato (A)	2	1340.49	32.91	**
Sustratos (S)	1	479.56	11.78	**
Variedades (V)	1	82.05	2.01	NS
Interacción (A x S)	2	232.30	5.70	**
Interacción (A x V)	2	63.38	1.56	NS
Interacción (S x V)	1	109.92	2.70	NS
Interacción (A x S x V)	2	15.57	0.38	NS
Error	33	40.72		
Total	47			

** = Altamente significativo <0.01 y NS = No hay significancia ≥ 0.05 .

Cuadro 5A. Análisis de varianza para la variable Grados Brix en las variedades de tomate estudiadas con las diferentes muestras de acrilato de potasio en los dos sustratos. UAAAN UL, 2021.

Causa de Variación	G. L.	Cuadrados medios	F cal	Nivel de significancia
Bloque	3	0.026	0.85	NS
Acrilato (A)	2	0.018	0.63	NS
Sustratos (S)	1	0.091	3.03	NS
Variedades (V)	1	0.016	0.56	NS
Interacción (A x S)	2	0.027	0.89	NS
Interacción (A x V)	2	0.004	0.14	NS
Interacción (S x V)	1	0.010	0.34	NS
Interacción (A x S x V)	2	0.003	0.13	NS
Error	33	0.030		
Total	47			

NS = No hay significancia ≥ 0.05 .

Cuadro 6A. Análisis de varianza para la variable Número de loculos en las variedades de tomate estudiadas con las diferentes muestras de acrilato de potasio en los dos sustratos. UAAAN UL, 2021.

Causa de Variación	G. L.	Cuadrados medios	F cal	Nivel de significancia
Bloque	3	0.050	2.31	NS
Acrilato (A)	2	0.017	0.81	NS
Sustratos (S)	1	0.035	1.62	NS
Variedades (V)	1	0.010	0.47	NS
Interacción (A x S)	2	0.035	1.65	NS
Interacción (A x V)	2	0.010	0.50	NS
Interacción (S x V)	1	0.016	0.78	NS
Interacción (A x S x V)	2	0.022	1.04	NS
Error	33	0.021		
Total	47			

NS = No hay significancia ≥ 0.05 .